



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**TESIS DOCTORAL**

---

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESPACIOS DISTRIBUIDOS DE  
APRENDIZAJE COLABORATIVO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE  
GRANDES SUPERFICIES INTERACTIVAS Y ELEMENTOS  
TANGIBLES**

---

Autor

**GUSTAVO SALVADOR HERRANZ**

Directores

**DR. MANUEL CONTERO  
DR. MARIANO ALCAÑIZ RAYA**

**Valencia, febrero de 2015**





## **RESUMEN**

El desarrollo de la tecnología ha repercutido indudablemente de forma positiva en los procesos educativos, ofreciendo principalmente nuevas formas de acceso, organización y entendimiento de la información, y nuevas vías de comunicación entre alumnos y profesores que facilitan la implementación de paradigmas educativos basados en ideas constructivistas y aprendizaje colaborativo.

Sin embargo, la tecnología puede suponer al mismo tiempo una barrera en el proceso de enseñanza/aprendizaje, en cuanto a que puede crear interferencias en el mismo. En este sentido, es habitual que los alumnos requieran entrenamiento previo en la plataforma o herramienta utilizada, lo cual supone una interrupción en el proceso educativo, obligándoles a desligarse durante un espacio de tiempo de los contenidos propios de la materia que estudian. Adicionalmente el alumno se ve forzado a adquirir destrezas en el manejo de la tecnología, lo que implica una nueva variable de exigencia que puede influir negativamente en su proceso de aprendizaje.

En respuesta a esta problemática, en esta tesis se pretende aportar soluciones basadas en la utilización de Interfaces Naturales de Usuario (Natural User Interfaces, NUI), que permitan un aprovechamiento de las posibilidades de la tecnología en el proceso educativo, evitando al máximo cualquier tipo de interferencia en el mismo. Este tipo de interfaces ofrecen al usuario una forma natural de interacción con la tecnología, similar a la que emplea en sus procesos cotidianos, que esconde su complejidad.

En líneas generales se ha seguido una metodología de investigación DSRM (Design Science Research Methodology), sobre cuyo esquema se han realizado sucesivas iteraciones, a partir de las conclusiones extraídas del análisis de los resultados en la evaluación de los artefactos desarrollados en iteraciones previas, que han contribuido a un refinamiento y mejora de la solución final.

En una primera etapa se exploró la aplicación de tecnología de Realidad Aumentada como herramienta susceptible de ser empleada en entornos de aprendizaje. La principal

motivación radicó en que pese a su reducido coste y facilidad de implantación en centros educativos, permite desarrollar interfaces naturales que simplifican la manipulación e interacción con la información digital. Sin embargo, pese a tratarse de una tecnología que ha demostrado ser válida como herramienta educativa, se observó que presentaba carencias en tareas de aprendizaje colaborativo, dificultando la comunicación en la forma "cara a cara" entre los estudiantes pertenecientes a un mismo grupo de trabajo.

En consecuencia, se optó por la exploración de soluciones basadas en la utilización de superficies digitales interactivas, también conocidas como sistemas "tabletop". Este tipo de dispositivos ofrecen una interfaz natural mediante la cual los usuarios pueden interactuar con el sistema realizando gestos con sus propias manos, de manera similar a como se trabajaría sobre una mesa o superficie de trabajo real. Adicionalmente, este tipo de sistemas resulta idóneo en tareas de aprendizaje colaborativo, gracias a que permiten el trabajo simultáneo de varios estudiantes facilitando una comunicación en la forma "cara a cara", de igual modo a como se establecería sobre una mesa de trabajo convencional.

Aunque este tipo de dispositivos ha sido previamente utilizado en entornos y tareas educativas, su integración en las aulas no ha sido transparente, lo cual sigue generando interferencias. En este sentido, uno de los principales objetivos de la tesis ha sido integrar este tipo de tecnología en las propias aulas de forma ubicua. Para ello se han diseñado y desarrollado sistemas que permiten implementar espacios de realidad mezclada, un subconjunto del concepto más amplio de computación ubicua, los cuales permiten integrar la tecnología en las aulas pero al mismo tiempo hacen que esta pase desapercibida. A tal fin, se ha desarrollado un conjunto de herramientas que permite transformar automáticamente las propias mesas y pupitres de trabajo de los alumnos en superficies digitales interactivas, cuando los contenidos que están estudiando requieren de información "aumentada" a la que aparece en los materiales y libros de texto tradicionales. De este modo, aunque la tecnología siempre está activa y presente en el aula, esta se mantiene latente y únicamente se manifiesta cuando es requerida por alumnos o profesores, o bien de forma automática cuando la información manejada sobre las superficies de trabajo tradicionales requiere de contenidos digitales adicionales. A este respecto, a modo de ejemplo, cuando el alumno deposita y abre sobre la mesa un libro por una determinada página, el sistema la reconoce de forma automática y proyecta junto a ella contenidos digitales interactivos relativos a su contenido.

Adicionalmente se ha desarrollado y evaluado una tecnología que permite la extensión de los espacios de trabajo colaborativo, que se establecen entre los alumnos de forma local alrededor de una superficie digital interactiva, en un modelo distribuido que permite la interconexión de distintos dispositivos, los cuales se pueden encontrar en ubicaciones remotas. En términos generales, se genera un espacio de trabajo común, que responde al concepto de computación en la nube, sobre que se conectan los distintos dispositivos. La forma de interacción con el sistema sigue manteniendo los principios de las Interfaces

Naturales y de los Espacios de Realidad Mezclada. A diferencia de otras soluciones, esta tecnología permite diseñar complejas orquestaciones de aula de forma sencilla y natural, ocultando la complejidad del sistema tanto a alumnos como a profesores.

Un aspecto destacable de la tesis consiste en la evaluación de forma rigurosa de los anteriores sistemas sobre numerosos contextos educativos reales, desde el punto de vista de tres parámetros principales: eficiencia, motivación y usabilidad. En general, los resultados obtenidos son coherente con la hipótesis de partida, que consiste en que este tipo de sistemas incrementa la motivación de los estudiantes gracias a la utilización de tecnología basada en interfaces naturales, que permiten ocultar la complejidad de la misma, lo cual repercute positivamente en la eficiencia del proceso educativo.

Adicionalmente, con el objetivo de simplificar los procesos de manejo e intercambio de información entre los distintos grupos de trabajo que conforman el modelo de espacio colaborativo distribuido, se ha dotado al sistema de la capacidad de interacción con el mismo mediante la utilización de manipuladores tangibles de información. Paralelamente, se ha desarrollado un novedoso método y tecnología que permite la utilización de elementos tangibles pasivos sobre superficies digitales interactivas implementadas mediante marcos ópticos, sobre las cuales no se conocen soluciones previas basadas en el uso de tecnologías pasivas. Este desarrollo presenta una solución muy económica y flexible que permite este tipo de interacción con esta clase de dispositivos tabletop, los cuales, gracias a su relación prestaciones/precio, crecen en popularidad.

Por último, también es reseñable el esfuerzo realizado para lograr la máxima simplificación en los procesos de manejo de la información. De este modo se ha dotado a la superficie interactiva de múltiples vías de introducción de nuevos contenidos, ofreciendo formas y métodos que permiten la digitalización de la información de una forma sencilla y natural, de modo que se establezca una relación sencilla entre el mundo real y el virtual, contribuyendo a la generación de los Espacios de Realidad Mezclada. En este sentido se han desarrollado métodos que permiten la integración de estos espacios de trabajo colaborativo distribuidos con otros tipos de tecnologías, tales como las principales redes sociales y espacios de almacenamiento en la, entre otras. En la misma línea, siguiendo una estrategia BYOD ("Bring Your Own Device"), el sistema permite la utilización de cualquier dispositivo smartphone, o similar, para añadir nueva información al espacio digital, teniendo en cuenta que en la actualidad este tipo de dispositivos es ampliamente utilizado y representa una forma directa y sencilla de introducción de nueva información al sistema.

## **ABSTRACT**

The development of technology has undoubtedly impacted positively in the educational process, mainly by offering new forms of access, organization and understanding of information, and new ways of communication between students and teachers to facilitate the implementation of educational paradigms based on constructivism and collaborative learning.

However, at the same time technology can result in a barrier in the teaching / learning process, since it can create interferences in it. In this regard, it is common that students require prior training on the platform or tool to be used, which involves a disruption in the normal educational process, forcing them to be break away for a time of the proper contents of the subject they are studying. Additionally, students are forced to acquire skills in handling technology, which involves a new exigency variable that may negatively influence their learning process.

In response to this problem, this thesis aims to provide new solutions based on the use of Natural User Interfaces (NUI), which allows exploiting the potential of technology in the educational process, maximum avoiding any interference in it. Such interfaces offer users a natural way to interact with technology, similar to that used in their everyday processes, hiding their complexity. Such interfaces provide users a natural way to interact with technology, similar to that used in their daily processes, hiding its complexity.

In general terms, a DSRM (Design Science Research Methodology) research methodology has been followed, by performing successive iterations of their schema, from the evaluation of artifacts developed in previous iterations, which have contributed to a refinement and improvement of the final solution.

In a first step, the application of the Augmented Reality technology as a tool capable of being used in learning environments was explored. The main motivation lies in that despite its low cost and ease of implementation in schools, it can develop natural interfaces that simplify handling and interaction with digital information. However, despite being a technology that has proved useful as an educational tool, it was found to

have deficiencies in collaborative learning tasks, hindering communication in the form "face to face" between students.

Consequently, it was decided to explore solutions based on the use of interactive digital surfaces, also known as "tabletop" systems. This type of devices provides a natural interface through which users can interact with the system via gestures with his hands. This type of system is suitable for collaborative learning tasks, by allowing simultaneous work of several students around the device, providing a "face to face" communication way between them.

Although this type of devices have previously been used in educational environments, their integration in the classroom has not been transparent enough, which still generates interferences in the educational process. In this sense, one of the main objectives of the thesis has been to integrate this type of technology in the classroom ubiquitously. For this task, systems that allow to implement mixed reality space, a subset of the broader concept of ubiquitous computing, were designed and developed, which allows integration of technology in the classroom, but making it go unnoticed. To this end, a set of tools were developed to automatically transform students own tables and desks in digital interactive surfaces, when the information handled by them requires "increased" data. In this regard, e.g., when a student opens a book by a particular page on the desk, the system automatically recognizes it and projects interactive digital contents relating to its contents.

Additionally, it has been developed and evaluated a technology that allows the extension of the collaborative workspaces, that are established between students locally around an interactive digital surface, in a distributed model that allows the interconnection of different devices, which can be found in remote locations. In general terms, a common virtual workspace is generated, which responds to the concept of cloud computing, on which the different devices are connected. The interaction with the system still follows the principles of Natural Interfaces and Mixed Reality Spaces. Unlike other solutions, this technology allows designing complex schemes of classroom orchestration in a natural and simply way, hiding the complexity of the system both to students and teachers.

A notable aspect of the thesis is that previous systems have been rigorously evaluated in numerous and real educational contexts, from the point of view of three main parameters: efficiency, motivation and usability. In general, the results obtained are consistent with the initial hypothesis, which consist in that these kinds of systems increases the motivation of students through the use of technology based on natural interfaces, that allow to hide the its complexity, which positively affects in the efficiency of the education process.



Additionally, in order to simplify the processes of handling and exchange of information between the different working groups of students that form the collaborative and distributed space model, the system was provided with interaction capacity meanwhile the use of tangible information handlers. In parallel, we developed a novel method and technology that allows the use of passive elements on tangible handlers over digital interactive surfaces implemented with optical frames technology, on which no previous solutions based on the use of passive technologies is known. This development presents an economical and flexible solution that allows this type of interaction with this class of tabletop devices, which, thanks to its price / performance ratio, are growing in popularity.

Finally, it is also worth mentioning the effort to achieve maximum simplicity in the information management processes. In this way, the system has been provided with multiple pathways of new content introduction, providing ways and methods for the digitization of information in a simple and natural way, so that a simple relationship between the real and virtual world is established, contributing to the generation of Blended Spaces. In this way, several methods have been developed to allow the integration of these distributed collaborative work spaces with other technologies, such as the major social networks and storage systems in the cloud, among others. On the same line, following a BYOD ("Bring Your Own Device") strategy, the system allows the use of any smartphone or similar device, to add new information to the digital space, considering that today these kinds of devices are widely used and represent a direct and simple way of introducing new information to the system.

## **RESUM**

El desenvolupament de la tecnologia ha repercutit indubtablement de forma positiva en els processos educatius, oferint principalment noves formes d'accés, organització i enteniment de la informació, i noves vies de comunicació entre alumnes i professors que faciliten la implementació de paradigmes educatius basats en idees constructivistes i aprenentatge col·laboratiu.

No obstant això, la tecnologia pot suposar al mateix temps una barrera en el procés d'ensenyanza/aprendizaje, en el fet que pot crear interferències en el mateix. En este sentit, és habitual que els alumnes requerisquen entrenament previ en la plataforma o ferramenta utilitzada, la qual cosa suposa una interrupció en el procés educatiu, obligant-los a deslligar-se durant un espai de temps dels continguts propis de la matèria que estudien. Addicionalment l'alumne es veu forçat a adquirir destreses en el maneig de la tecnologia, la qual cosa implica una nova variable d'exigència que pot influir negativament en el seu procés d'aprenentatge.

En resposta a esta problemàtica, en esta tesi es pretén aportar solucions basades en la utilització d'Interfícies Naturals d'Usuari (Natural User Interfícies, NUI) , que permeten un aprofitament de les possibilitats de la tecnologia en el procés educatiu, evitant al màxim qualsevol tipus d'interferència en el mateix. Este tipus d'interfícies oferixen a l'usuari una forma natural d'interacció amb la tecnologia, semblant a què empra en els seus processos quotidians, que amaga la seua complexitat.

En línies generals s'ha seguit una metodologia d'investigació DSRM (Design Science Research Methodology) , sobre l'esquema del qual s'han realitzat successives iteracions, a partir de les conclusions extretes de l'anàlisi dels resultats en l'avaluació dels artefactes desenvolupats en iteracions prèvies, que han contribuït a un refinament i millora de la solució final.

En una primera etapa es va explorar l'aplicació de tecnologia de Realitat Augmentada com a ferramenta susceptible de ser empleada en entorns d'aprenentatge. La principal motivació va radicar en que a pesar del seu reduït cost i facilitat d'implantació en centres educatius, permet desenvolupar interfícies naturals que simplifiquen la manipulació i

interacció amb la informació digital. No obstant això, a pesar de tractar-se d'una tecnologia que ha demostrat ser vàlida com a ferramenta educativa, es va observar que presentava carències en tasques d'aprenentatge col·laboratiu, dificultant la comunicació en la forma "cara a cara" entre els estudiants pertanyents a un mateix grup de treball.

En conseqüència, es va optar per l'exploració de solucions basades en la utilització de superfícies digitals interactives, també conegudes com a sistemes "tabletop". Este tipus de dispositius ofereixen una interfície natural per mitjà de la qual els usuaris poden interaccionar amb el sistema realitzant gestos amb les seues pròpies mans, de manera semblant a com es treballaria sobre una taula o superfície de treball real. Addicionalment, este tipus de sistemes resulta idoni en tasques d'aprenentatge col·laboratiu, gràcies a què permeten el treball simultani de diversos estudiants facilitant una comunicació en la forma "cara a cara", de la mateixa manera a com s'establiria sobre una taula de treball convencional.

Encara que este tipus de dispositius ha sigut prèviament utilitzat en entorns i tasques educatives, la seua integració en les aules no ha sigut transparent, la qual cosa continua generant interferències. En este sentit, un dels principals objectius de la tesi ha sigut integrar este tipus de tecnologia en les pròpies aules de forma ubíqua. Per a això s'han dissenyat i desenrotllat sistemes que permeten implementar espais de realitat mesclada, un subconjunt del concepte més ampli de computació ubíqua, els quals permeten integrar la tecnologia en les aules però al mateix temps fan que esta passe desapercibuda. Amb este fi, s'ha desenrotllat un conjunt de ferramentes que permet transformar automàticament les pròpies taules i pupitres de treball dels alumnes en superfícies digitals interactives, quan els continguts que estan estudiant requereixen d'informació "augmentada" a la que apareix en els materials i llibres de text tradicionals. D'esta manera, encara que la tecnologia sempre està activa i present en l'aula, esta es manté latent i únicament es manifesta quan és requerida per alumnes o professors, o bé de forma automàtica quan la informació manejada sobre les superfícies de treball tradicionals requereix de continguts digitals addicionals. A este respecte, a manera d'exemple, quan l'alumne deposita i obri sobre la taula un llibre per una determinada pàgina, el sistema la reconeix de forma automàtica i projecta junt amb ella continguts digitals interactius relatius al seu contingut.

Addicionalment s'ha desenrotllat i avaluat una tecnologia que permet l'extensió dels espais de treball col·laboratiu, que s'establixen entre els alumnes de forma local al voltant d'una superfície digital interactiva, en un model distribuït que permet la interconnexió de distints dispositius, els quals es poden trobar en ubicacions remotes. En termes generals, es genera un espai de treball comú, que respon al concepte de computació en el núvol, sobre que es connecten els distints dispositius. La forma d'interacció amb el sistema continua mantenint els principis de les Interfícies Naturals i dels Espais de Realitat Mesclada. A diferència d'altres solucions, esta tecnologia permet dissenyar complexes orquestracions

d'aula de forma senzilla i natural, ocultant la complexitat del sistema tant a alumnes com a professors.

Un aspecte destacable de la tesi consistix en l'avaluació de forma rigorosa dels anteriors sistemes sobre nombrosos contextos educatius reals, des del punt de vista de tres paràmetres principals: eficiència, motivació i usabilidad. En general, els resultats obtinguts són coherent amb la hipòtesi de partida, que consistix en el fet que este tipus de sistemes incrementa la motivació dels estudiants gràcies a la utilització de tecnologia basada en interfícies naturals, que permeten ocultar la complexitat de la mateixa, la qual cosa repercutix positivament en l'eficiència del procés educatiu.

Adicionalment, amb l'objectiu de simplificar els processos de maneig i intercanvi d'informació entre els distints grups de treball que conformen el model d'espai col·laboratiu distribuït, s'ha dotat al sistema de la capacitat d'interacció amb el mateix per mitjà de la utilització de manipuladors tangibles d'informació. Paral·lelament, s'ha desenrotllat un nou mètode i tecnologia que permet la utilització d'elements tangibles passius sobre superfícies digitals interactives implementades per mitjà de marcs òptics, sobre les quals no es coneixen solucions prèvies basades en l'ús de tecnologies passives. Este desenrotllament presenta una solució molt econòmica i flexible que permet este tipus d'interacció amb esta classe de dispositius tabletop, els quals, gràcies a la seua relació prestacions/precio, creixen en popularitat.

Finalment, també és ressenyable l'esforç realitzat per a aconseguir la màxima simplificació en els processos de maneig de la informació. D'esta manera s'ha dotat a la superfície interactiva de múltiples vies d'introducció de nous continguts, oferint formes i mètodes que permeten la digitalització de la informació d'una forma senzilla i natural, de manera que s'establisca una relació senzilla entre el món real i el virtual, contribuint a la generació dels Espais de Realitat Mesclada. En este sentit s'han desenrotllat mètodes que permeten la integració d'estos espais de treball col·laboratiu distribuïts amb altres tipus de tecnologies, com ara les principals xarxes socials i espais d'emmagatzemament en la, entre altres. En la mateixa línia, seguint una estratègia BYOD ("Bring Your Own Device"), el sistema permet la utilització de qualsevol dispositiu smartphone, o semblant, per a afegir nova informació a l'espai digital, tenint en compte que en l'actualitat este tipus de dispositius és àmpliament utilitzat i representa una forma directa i senzilla d'introducció de nova informació al sistema.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	2
1.2. Metodología de investigación .....	5
1.3. Estructura de la Tesis.....	12
1.4.- Lista de publicaciones vinculadas a la realización de la Tesis Doctoral .....	14
<b>2. ESTADO DEL ARTE EN LA UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS GRÁFICAS INTERACTIVAS EN ENTORNOS EDUCATIVOS Y PARADIGMAS DE APRENDIZAJE COLABORATIVO .....</b>	<b>17</b>
2.1.- Realidad Virtual.....	18
2.2. Realidad Aumentada .....	21
2.3. Interfaces interactivos ubicuos y basados en elementos tangibles .....	23
2.4. Serious games .....	27
2.5. Embodied Learning.....	27
2.6. Paradigmas de aprendizaje colaborativo .....	28
<b>3. EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REALIDAD AUMENTADA COMO HERRAMIENTA DE APRENDIZAJE BASADA EN INTERFACES NATURALES.....</b>	<b>31</b>
3.1.- Antecedentes .....	32
3.2.- Aplicación de Realidad Aumentada y desarrollo de contenidos didácticos.....	34
3.3.- Arquitectura del Software .....	36

3.4.- Evaluación del Sistema .....	37
3.5.- Análisis de los Resultados y Conclusiones .....	43
<b>4. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE APRENDIZAJE COLABORATIVO BASADO EN SUPERFICIES INTERACTIVAS Y ELEMENTOS TANGIBLES .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1. Descripción del sistema .....</b>	<b>51</b>
4.1.1. Detalles de la implementación. Arquitectura Hardware y Software ..	53
<b>4.2. Desarrollo de contenidos educativos .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3. Capacidades añadidas a partir de la capacidad del sistema en reconocimiento de marcas fiduciales .....</b>	<b>58</b>
4.3.1. Utilización de marcas fiduciales para implementar interacción mediante la utilización de elementos tangibles.....	59
4.3.2. Utilización de marcas fiduciales para identificar y registrar las acciones de los alumnos .....	60
<b>4.4. Evaluación del Sistema .....</b>	<b>63</b>
4.4.1.- Eficiencia .....	65
4.4.2.- Usabilidad/Satisfacción .....	71
4.4.3.- Motivación .....	73
4.4.4.- Experiencias adicionales .....	75
<b>4.5.- Análisis de los resultados y conclusiones .....</b>	<b>78</b>
<b>5.- IMPLEMENTACIÓN DE UN ESPACIO INTERACTIVO BASADO EN EL CONCEPTO DE REALIDAD MEZCLADA DESTINADO A TAREAS DE APRENDIZAJE Y TRABAJO COLABORATIVO EN ENTORNOS DISTRIBUIDOS .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1.- Descripción del sistema .....</b>	<b>82</b>
5.1.1.- Interfaz básico .....	83
5.1.2.- Operaciones básicas de manejo y gestión de la información .....	85
5.1.3.- Estructura básica de la información .....	87
<b>5.2. Modelo de espacio de trabajo colaborativo distribuido .....</b>	<b>89</b>
5.2.1. Espacio colaborativo local .....	90
5.2.2. Espacio colaborativo local extendido .....	91

5.2.3. Espacio colaborativo distribuido .....	92
<b>5.3. Adición de nueva información al tablero virtual .....</b>	<b>95</b>
5.3.1. Bring Your Own Device (BYOD).....	95
5.3.2. Escaneado automático de imágenes desde el propio Tabletop .....	97
<b>5.4. Arquitectura del sistema y detalles de implementación .....</b>	<b>99</b>
5.4.1. Motor de gráficos y de físicas .....	99
5.4.2. Arquitectura distribuida y multiplataforma .....	100
5.4.3. Procesos demonio para E-Mail y Twitter .....	101
5.4.4. Estructuras de datos .....	102
<b>5.5. Prueba piloto.....</b>	<b>104</b>
5.5.1. Contexto .....	104
5.5.2. Metodología .....	105
<b>6.- DESARROLLO DE APLICACIONES EDUCATIVAS SOBRE EL MODELO DE ESPACIO COLABORATIVO DISTRIBUIDO .....</b>	<b>107</b>
<b>6.1.- Espacios de aprendizaje colaborativo basados en mapas conceptuales .....</b>	<b>107</b>
6.1.1.- Implementación de mapas conceptuales sobre el modelo de espacio colaborativo distribuido .....	109
6.1.2.- Evaluación del sistema .....	111
6.1.2.1. Primera experiencia: evaluación del sistema como herramienta educativa sobre un grupo de alumnos de secundaria .....	112
6.1.2.2. Segunda experiencia: evaluación del sistema como herramienta educativa sobre un grupo de estudiantes de Ingeniería en Diseño Industrial .....	115
<b>6.2. Herramienta de fomento de la creatividad .....</b>	<b>118</b>
6.2.1. Antecedentes.....	121
6.2.2. La "Máquina de Ideas" .....	121
6.2.2.1. SCAMPER.....	122
6.2.2.2. Generador aleatorio de ideas.....	123
6.2.2.3 Extracción automática de métricas de uso .....	125
6.2.3. Evaluación del sistema.....	126
6.2.4. Conclusiones.....	128
<b>7.- INCORPORACION DE INTERACCION MEDIANTE ELEMENTOS TANGIBLES FISICOS AL MODELO DE ESPACIO COLABORATIVO DISTRIBUIDO.....</b>	<b>131</b>

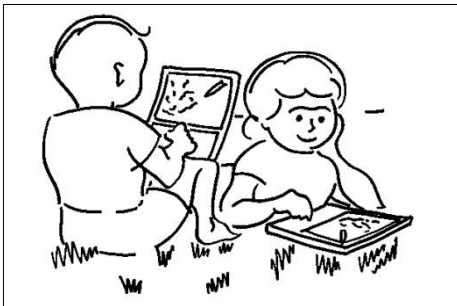


<b>7.1. Desarrollo de manipuladores tangibles pasivos para dispositivos Tabletop implementados mediante tecnología basada en marcos ópticos.....</b>	<b>132</b>
7.1.1. Implementación de dispositivos tabletops mediante la utilización de marcos ópticos infrarrojos .....	132
7.1.2. Manipuladores tangibles sobre marcos ópticos .....	134
<b>7.2. Desarrollo de manipuladores tangibles híbridos con marcas fiduciales .....</b>	<b>142</b>
<b>7.3. Extensión del interfaz natural del modelo de espacio colaborativo distribuido mediante la incorporación de manipuladores tangibles .....</b>	<b>144</b>
7.3.1. Manipulación del plano de trabajo.....	145
7.3.2. Manipulación de información en modo local .....	145
7.3.3. Manipulación de información en modo distribuido .....	147
<b>7.4. Conclusiones.....</b>	<b>148</b>
<b>8.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>149</b>
<b>9. REFERENCIAS.....</b>	<b>155</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de tecnologías gráficas interactivas y nuevos tipos de interfaces en tareas de enseñanza y aprendizaje ha sido un tema de interés para investigadores desde prácticamente sus inicios y éste se ha ido incrementando y desarrollando de forma paralela a como lo ha ido haciendo la propia tecnología.

Ya en 1972, Alan C. Kay, del Xerox PARC <sup>1</sup>, presentó un estudio titulado “A Personal Computer for Children of All Ages” [47] en el que analizó el impacto que tendría en la educación el empleo de un hipotético pequeño dispositivo al que llamó “Dynabook”. Sin duda alguna se trató de un análisis premonitorio y hoy en día numerosos centros educativos de todo el mundo han incorporados aparatos similares, a los que ahora llamamos “Tablet Computers”, en sus aulas y procedimientos docentes.



*Figura 1:* Concepto de uso del Dynabook en un contexto educativo (izquierda). Alan Kay mostrando un prototipo del Dynabook (derecha).

En la actualidad el número de tecnologías susceptibles de ser empleadas en las aulas se ha desarrollado de manera muy significativa. La Realidad Virtual, por ejemplo, lleva mucho años utilizándose en entornos de investigación, pero su alto costo únicamente permitía su aplicación en grandes empresas o instituciones. Hoy en día esta tecnología a

---

<sup>1</sup> Xerox PARC (Palo Alto Research Center, ‘Centro de Investigación de Palo Alto’) es una empresa de investigación y desarrollo, propiedad de Xerox Corporation, fundada en 1970 y con sede en Palo alto (California, EE.UU.). Desde entonces ha sido reconocida mundialmente por sus contribuciones e importantes desarrollos en la industria del hardware y software, siendo el creador de algunos de los estándares actuales más comúnmente usados.

reducido drásticamente su coste, situándolo en muchos casos al nivel de dispositivos multimedia de consumo, a la par que ha mejorado notablemente sus prestaciones y posibilidades de aplicación. Su empleo como herramienta docente abre un mundo nuevo de posibilidades difícil de imaginar años atrás. La Realidad Aumentada es otro caso similar, con recientes desarrollos en nuevos y prometedores dispositivos. Por su parte los interfaces multimedia e interactivos también han evolucionado y a modo de ejemplo disponer hoy en día de superficies multi-táctiles de pequeño, medio y gran formato es algo habitual. Avances en sistemas proyectivos, nuevos conceptos de computación móvil, smartphones, incrementos en el ancho de banda de las redes de datos, mejoras en los interfaces hombre-máquina, evolución de los servicios de internet y el desarrollo de las redes sociales, etc., completan un sin fin de nuevas posibilidades de aplicación e involucración de las nuevas tecnologías en los procesos educativos.

Sin embargo, la incorporación a las aulas de este tipo de dispositivos e interfaces no garantiza per se una mejora en el proceso de enseñanza/aprendizaje. La utilización de este tipo de tecnologías requiere de análisis previos, diseño de nuevos paradigmas y profundos estudios que garanticen la adecuación de su utilización en entornos educativos. En este sentido, el desarrollo de nuevos paradigmas, tales como los basados en el constructivismo, facilitan la utilización de estas tecnologías y se benefician de ellas.

## **1.1. Objetivos**

En el presente trabajo de Tesis se pretenden desarrollar espacios de aprendizaje colaborativo basados en el concepto de realidad mezclada y computación ubicua, en los cuales, mediante la utilización de interfaces naturales, la tecnología pasa desapercibida a los usuarios, aunque se benefician de ella.

En la actualidad, los paradigmas educativos basados en el constructivismo juegan un papel cada vez más importante en los procesos de enseñanza. Tal y como muestra la bibliografía, este tipo de procesos educativos resultan especialmente interesantes en modelos de aprendizaje colaborativos y cooperativos.

Corrientes educativas como el "Knowledge Building", se basan en esta idea. Según su filosofía, el conocimiento no reside el alumno a nivel particular, sino más bien en el propio grupo. De este modo el es propio alumno el que debe gestionar su propio conocimiento, extrayéndolo del grupo. El profesor debe guiar a los alumnos en el camino e aprendizaje, ayudándoles a generar las estructuras correctas y ayudándoles en la búsqueda de fuentes y organización de la información.

La tecnología, sin duda alguna, contribuye positivamente a este tipo de aprendizaje, ofreciendo innumerables fuentes y herramientas de tratamiento y gestión de la información, así como múltiples vías de comunicación.

Sin embargo, de la bibliografía se extrae que de igual modo, la tecnología puede representar una barrera al proceso de aprendizaje en cuanto que puede crear interferencias en el mismo. Habitualmente los alumnos deben aprender a manejar aplicaciones, equipos, métodos de tratamiento de la información, plataformas de comunicación, etc., consumiendo un tiempo valioso y añadiendo complejidades adicionales al proceso educativo.

En la misma línea, varios trabajos de investigación plantean la problemática de la limitación que se produce en el proceso de comunicación entre los miembros de un equipo, cuando estos trabajan con ordenadores personales. En estos casos, los alumnos se concentran a nivel individual en las propias pantallas de sus equipos, estableciéndose una comunicación en el equipo que en la bibliografía se ha denominado de tipo "hombro a hombro". Sin embargo, por otra parte, en casi toda la literatura descriptiva de las técnicas de aprendizaje colaborativo y basado en paradigmas constructivistas, la buena comunicación entre los miembros de los equipos se revela como un parámetro imprescindible.

De este modo, se pretende desarrollar un espacio de aprendizaje colaborativo que aproveche las ventajas de la tecnología que consiga que esta resulte transparente a los alumnos, facilitando la comunicación entre los miembros de los equipos.

Para ello, el sistema desarrollado se centrará en la utilización de sistemas del tipo tabletop. Este tipo de sistemas ofrece una gran superficie interactiva de trabajo que se dispone de manera horizontal y sobre la que se trabaja de modo similar a como se haría sobre una mesa real. Este tipo de dispositivos facilitan la comunicación que se ha llamado del tipo "cara-a-cara" entre los distintos miembros del equipo.

El sistema debe completarse con el desarrollo de un software que ofrezca un interfaz natural al usuario, el cual presente formas de interacción con la información digital que resulten metáforas de las acciones reales sobre los objetos físicos. A este respecto los dispositivos tabletop permiten interactuar con el sistema utilizando los propios dedos y manos de los usuarios, realizando acciones mediante gestos. Este software desarrollado deberá asemejar este tipo de gestos sobre el dispositivo a acciones reales de manejo de la información en el caso real.

Adicionalmente, de manera más global, se pretende desarrollar un modelo que permita una orquestación de aula completa basada en el uso transparente de la tecnología. Para ello se partirá de la utilización de un sistema tabletop proyectivo, desarrollado en trabajos

anteriores del grupo de investigación, que permite transformar cualquier tipo de superficie un sistema tabletop interactivo.

De este modo, se persigue poder transformar los propios pupitres y mesas de trabajo de los alumnos en superficies interactivas cuando resulte preciso, de forma transparente y automática según el momento e información que manejen los alumnos en cada instante. Se pretende, por lo tanto, crear un espacio basado en el concepto de realidad mezclada y computación ubicua, que permita que la tecnología siempre esté presente y activa en el aula, pero que el alumno no la perciba mientras no sea necesaria.

Por otra parte, se pretende desarrollar una plataforma de software genérica que, siguiendo los mismo principios de interfaces naturales y espacios de realidad mezclada, permita aglutinar a todos los grupos de trabajo implicados en una tarea común de aprendizaje colaborativo. Se pretende que la plataforma sea lo suficientemente genérica como para que permita trabajar tanto en un modo colaborativo local (varios alumnos alrededor un único tabletop) como a varios grupos de trabajo en un modelo colaborativo distribuido. El modelo de espacio de trabajo colaborativo ofrecerá un espacio de trabajo común sobre el que los distintos grupos de trabajo se podrán mover libremente, mediante la realización de gestos naturales. En este marco, a modo de ejemplo, un equipo podrá visitar virtualmente el trabajo de otro equipo, incluso colaborar de manera simultánea sobre la misma información. Sobre esta plataforma se pretenden crear métodos y vías de envío y manejo de la información (imágenes, textos o modelos 3D) que resulten lo suficientemente flexibles y naturales como para crear un espacio de realidad mezclada en el que la información pueda fluir desde el mundo real al virtual de una forma sencilla y natural, y de este modo contribuir a orquestaciones de aula y espacios educativos basados en el concepto de realidad mezclada.

Con el objetivo de realizar ensayos y pruebas de evaluación, se desarrollarán aplicaciones específicas sobre ellos, que permitan someter a los sistemas a casos de uso sobre entornos educativos reales. En estos ensayos se deberá poder constatar que el sistema cumple con los requisitos de usabilidad necesarios como para poder garantizar que su uso resulta transparente a los alumno y no supone una barrera en el proceso educativo. De igual modo, se realizarán experiencias en las que poder comprobar la eficiencia del sistema, desde el punto de vista de la adquisición de nuevos conocimientos, esperando en todo caso extraer datos que confirmen que los alumnos no obtienen peores calificaciones cuando usan el nuevo sistema frente a los métodos tradicionales.

La hipótesis general de partida consiste en que gracias al uso de interfaces naturales y espacios de realidad mezclada, los alumnos se beneficiarán de la tecnología sin que esta interfiera negativamente en el proceso educativo, motivo por el cual se alcanzará un mayor grado de motivación en clase, que debe repercutir positivamente en los resultados de eficiencia finales obtenidos.

Por ello, en líneas generales, las evaluaciones desde estos tres puntos de vista: eficiencia, usabilidad y motivación.

Por último, con el objetivo de contribuir todavía más al concepto de realidad mezclada, y siguiendo las recomendaciones de interesantes trabajos en la bibliografía, se desarrollaran nuevos métodos de interacción con el sistema basados en manipuladores tangibles, los cuales permite crear metáforas de uso de operaciones y manejo de la información digital de forma similar a como se realizaría con información física en el caso real.

## 1.2. Metodología de investigación

El presente trabajo de tesis pretende encontrar soluciones a la interferencia que el uso de la tecnología puede establecer en el proceso educativo. Para ello, en líneas generales, se plantea como objetivo desarrollar nuevas herramientas basadas en la utilización de interfaces naturales, las cuales son capaces de esconder la complejidad de la tecnología haciéndola transparente al usuario.

En general, se plantea el diseño de nuevas herramientas/artefactos que permitan resolver un problema identificado. Una vez diseñadas y desarrolladas, estas herramientas deberán ser probadas y evaluadas con el objetivo de comprobar su efectividad en la resolución de estos problemas, de modo que puedan pasar a formar parte de un nuevo conjunto de conocimiento mediante la comunicación de las contribuciones.

De este modo, para el desarrollo del trabajo de investigación presentado en esta tesis se eligió seguir una metodología de investigación DSRM (Design Science Research Methodology) [69]. Esta metodología consta de seis fases secuenciales (Figura 2): identificación del problema y motivación, definición de los objetivos a alcanzar con una solución, diseño y desarrollo de la solución, demostración, evaluación y comunicación.

1. **Identificación del problema y motivación.** En esta fase se define el problema de investigación específico y se justifica el valor que aportaría encontrar una solución. Dado que la definición del problema será utilizada en el desarrollo del artefacto que pueda de modo efectivo proporcionar una solución al mismo, resulta útil atomizar el problema a nivel conceptual de modo que la solución pueda capturar su complejidad. La justificación del valor de la solución implica dos objetivos: debe resultar motivadora tanto para el investigador como para la audiencia a la que van dirigidos los resultados de la investigación y por otro lado debe ayudar a entender el razonamiento asociado al entendimiento que tiene el investigador del problema. Los recursos requeridos

en esta fase incluyen el conocimiento del estado del problema y la importancia de encontrar una solución.

2. **Definición de los objetivos a alcanzar con una solución.** En esta fase se deben inferir los objetivos de la solución a partir de la definición del problema y del conocimiento de lo que es posible y factible. Los objetivos pueden ser cuantitativos, v. g., términos en los que una solución sería mejor que otras ya existentes, o cualitativos, v. g., una descripción de como se espera que un nuevo artefacto pueda proporcionar soluciones a un problema no abordado hasta ahora. Los objetivos deberían ser inferidos de forma racional a partir de la especificación del problema. Los recursos requeridos en esta fase incluyen el conocimiento del estado del problema y la existencia de soluciones actuales, si existen, así como su eficacia.
3. **Diseño y desarrollo.** Esta fase consiste en el desarrollo del artefacto, entendiéndose como tal construcciones, modelos, métodos, instancias, o nuevas propiedades de recursos técnicos, sociales y/p informacionales. Conceptualmente, un artefacto de investigación de diseño puede ser cualquier objeto diseñado en el cual una contribución de investigación forma parte del propio diseño. Esta actividad incluye la determinación de la funcionalidad deseada para el artefacto, así como su arquitectura. Los recursos requeridos en esta fase de transición entre el planteamiento de los objetivos y el diseño y desarrollo incluyen un conocimiento de la teoría que debe llevar a encontrar una solución.
4. **Demostración.** Esta fase consiste en demostrar el uso del artefacto en la resolución de una o más instancias del problema identificado. Puede implicar su uso en experimentos, simulaciones, casos de estudio, pruebas, o cualquier otra actividad apropiada. Los recursos requeridos para la demostración incluyen un conocimiento efectivo de cómo usar el artefacto en la resolución del problema.
5. **Evaluación.** Esta fase consiste en la observación y métrica de los beneficios aportados por la solución desarrollada al problema. Esta actividad involucra la comparación de los objetivos pretendidos con los resultados arrojados por la solución desarrollada en la fase de demostración. Para ello se requiere del conocimiento de relevantes técnicas y métricas de análisis. Dependiendo de la naturaleza del problema y del artefacto desarrollado, la evaluación puede tomar diferentes formas, pudiendo incluir ítems tales como la comparación de la funcionalidad del artefacto con la definición de los objetivos planteados en la fase dos, medidas objetivas y cuantitativas de desempeño, encuestas de satisfacción, información de retroalimentación de los usuarios, o simulaciones.

Conceptualmente, la evaluación podría incluir cualquier evidencia empírica o prueba lógica que resultara apropiada. Al final de esta fase, los investigadores deben decidir si la solución desarrollada por el artefacto desarrollado cumple suficientemente con los objetivos de la solución y se puede pasar a la última fase de comunicación, planteando mejoras adicionales para proyectos posteriores, o si por el contrario se debe regresar a la fase tres para intentar mejorar la efectividad del artefacto, caso de ser factible.

6. **Comunicación.** En esta fase se debe comunicar a la comunidad científica, y a cualquier otra audiencia relevante, el problema analizado y su importancia, el artefacto desarrollado en solución al mismo, su utilidad y grado de novedad, el rigor seguido en su diseño y su efectividad. Las publicaciones de investigación científica pueden seguir una estructura similar a la de esta metodología, tal y como la estructura nominal de los procesos de investigación empírica (definición del problema, revisión de la bibliografía, desarrollo de una hipótesis, recolección de datos, análisis, resultados, discusión y conclusión). Esta fase requiere conocimientos acerca de la cultura de la disciplina en la que se enmarca el trabajo.

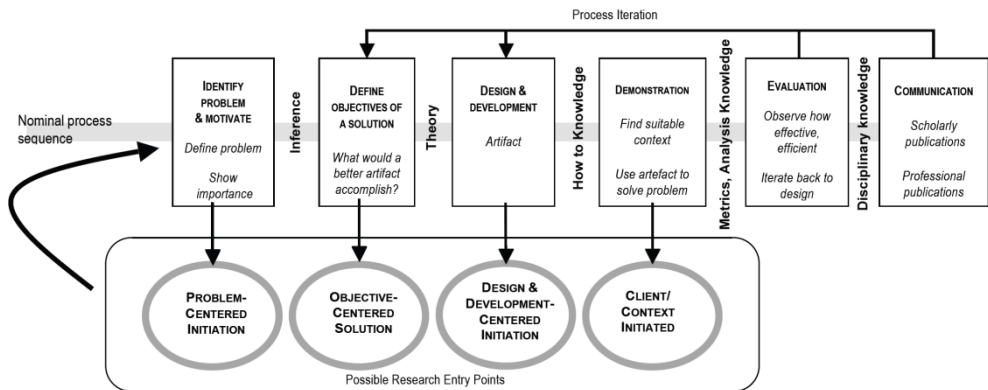


Figura 2: Esquema del proceso planteado por la metodología de investigación DSRM (Design Science Research Methodology) [69].

Una característica de la metodología DSRM es la posibilidad de acceder desde cuatro puntos de entrada al proceso de investigación, que son: iniciación centrada en el problema (donde un problema es identificado y requiere de una solución), iniciación centrada en el objetivo (cuando las ventajas que aportaría un mejor artefacto motivan un nuevo diseño), iniciación a partir de una motivación en el diseño y desarrollo (cuando nuevos desafíos técnicos inician un nuevo proceso de diseño) e iniciación a partir del usuario o del contexto (donde los usuarios o el propio contexto sugieren modificaciones en el diseño).



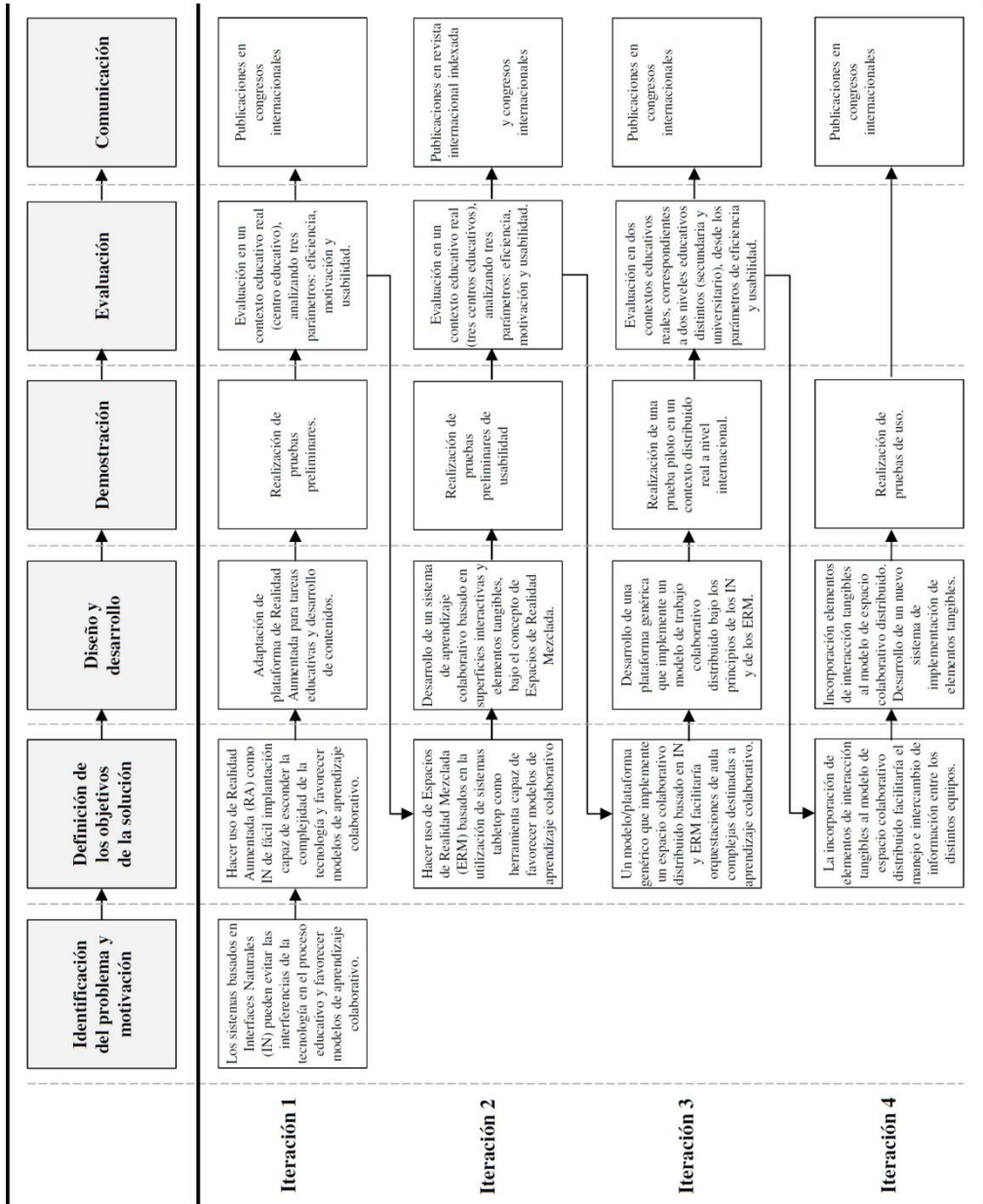


Figura 3: Proceso de investigación seguido en la tesis.

La Figura 3 resume el proceso de investigación seguido en esta tesis, el cual consiste en cuatro iteraciones de la metodología DSRM con las que se ha ido refinando y aportando nuevas soluciones al problema inicial. Cada una de las iteraciones constituye una contribución por sí misma, generando soluciones que han arrojado resultados positivos en las evaluaciones y han dado lugar a publicaciones en la comunidad científica. Sin embargo, en la evaluación de cada una de las soluciones se encontraron nuevos retos que justificaron el inicio de un nuevo ciclo a partir un replanteamiento de los objetivos con el fin de encontrar una mejor solución al problema inicial.

En la primera etapa de la investigación se propuso una solución basada en la utilización de tecnología de Realidad Aumentada, la cual es capaz de ofrecer una Interfaz Natural que esconde la complejidad de la tecnología, a un reducido coste y simplicidad técnica que facilita su implantación en los centros educativos. El trabajo desarrollado en esta fase se detalla en el Capítulo 3 y generó una contribución [87] consistente en el desarrollo de una plataforma y contenidos educativos que permitieron la realización de una profunda evaluación de la Realidad Aumentada como herramienta de apoyo a la docencia. Dicha evaluación se realizó en un contexto educativo real, y respondía a una de las carencias detectadas en la fase de revisión del estado del arte. La evaluación se centró en el análisis de tres parámetros principales: eficiencia, usabilidad y motivación. De los resultados obtenidos se desprende una justificación de la utilidad de la Realidad Aumentada como herramienta educativa, desde el punto de vista de que consiguió elevar de forma significativa el grado de motivación en los estudiantes y resultó lo suficientemente transparente y sencilla en su manejo como para no requerir entrenamiento previo en alumnos y profesores, lo cual derivó en un aumento en las calificaciones. En la experiencia de evaluación, aunque la herramienta no se desarrolló específicamente para tal fin, los profesores la emplearon en un contexto de aprendizaje colaborativo, al tratarse de una metodología seguida en el centro. Aunque no fue evaluado de forma objetiva, se observó dificultad en el trabajo en equipo de los alumnos. El principal problema detectado fue dificultad en la comunicación entre los miembros de los equipos, al tener que centrar la vista en las pantallas de los ordenadores o pizarras digitales. Se observó que se establecía una comunicación hombro-a-hombro, en lugar de la deseada cara-a-cara en un entorno de trabajo y aprendizaje colaborativo. Este problema detectado en la fase de evaluación derivó en el replanteamiento de los objetivos de la solución, dando lugar a una nueva iteración en el proceso de investigación, correspondiente a la segunda etapa.

En la segunda etapa de la investigación se exploró la utilización de dispositivos tabletop como herramienta susceptible de ser utilizada en entornos de aprendizaje colaborativo. Este tipo de dispositivos presentan una gran superficie digital interactiva que ofrece a los usuarios una interfaz natural basada en la interacción con el sistema mediante la realización de gestos con las manos. Un objetivo destacable en esta etapa de la investigación consistió en el desarrollo de espacios de aprendizaje colaborativo basados en el concepto de los Espacios de Realidad Mezclada, los cuales representan un subconjunto

de los espacios basados en computación ubicua. Para ello se utilizó un tipo de dispositivo tabletop desarrollado en un trabajo previo por el mismo equipo investigador [13], capaz de proyectar una superficie digital interactiva sobre cualquier mesa de trabajo o superficie plana convencional. De este modo, una contribución importante de esta etapa de la investigación consistió en el desarrollo de un espacio de aprendizaje colaborativo híbrido, donde los alumnos comparten pupitres y mesas de trabajo convencionales con superficies digitales interactivas que se activan de forma automática cuando la información manejada sobre las superficies de trabajo (libros de texto, etc.) así lo requieren. El sistema, junto con la totalidad de sus características y fases de investigación, es descrito en el Capítulo 4 y dio lugar a dos publicaciones en conferencias internacionales [83, 88]. El sistema fue evaluado en un contexto educativo real, mediante la realización de tres experiencias independientes en respectivos centros educativos. Nuevamente la evaluación se centró en el análisis de tres parámetros principales: eficiencia, usabilidad y motivación. Los resultados obtenidos fueron positivos en todos los casos, demostrando con significancia estadística mejoras en la motivación de los alumnos. De igual modo, de los resultados de los test de usabilidad y satisfacción, se desprende un alto grado de transparencia a la complejidad subyacente en la tecnología. En consecuencia, en todos los casos se observan mejoras significativas en las calificaciones de los alumnos. Una observación del investigador a lo largo del desarrollo de las experiencias de evaluación, las cuales se realizaron utilizando dos prototipos tales como el presentado en [13] que permitían establecer de forma simultánea dos grupos de alumnos en sendos espacios de aprendizaje colaborativo, fue la independencia que se establecía entre los dos grupos, dando lugar a dos núcleos totalmente independientes de aprendizaje colaborativo. De estas observaciones surgió la necesidad de desarrollar una plataforma distribuida que ofrezca un espacio de trabajo común a cuantos grupos y equipos de trabajo se conecten a ella a través de dispositivos tabletop, permitiendo orquestaciones de aula más complejas, desde el punto de vista de la distribución organizativa, que impliquen a la totalidad de los alumnos en la solución de problemas comunes, facilitando el intercambio de información entre los diferentes grupos de alumnos que forman núcleos de aprendizaje colaborativo. La detección de esta problemática dio lugar nuevamente a un nuevo replanteamiento de los objetivos de la solución que derivó en una tercera iteración en el proceso de investigación.

El objetivo de la tercera etapa de la investigación consistió en desarrollar un modelo/plataforma genérica capaz de implementar un espacio de aprendizaje colaborativo distribuido y que al mismo tiempo responda a los principios de las Interfaces Naturales y de los Espacios de Realidad Mezclada. También como objetivo se decidió crear una plataforma lo suficientemente compatible con distintas tecnologías de implementación de sistemas tabletop, capaz de generar orquestaciones de aula formadas por un conjunto de dispositivos heterogéneo. El proceso seguido en la investigación, así como el desarrollo y características del sistema se presenta en el Capítulo 5, que también recoge los resultados de la realización de una primera prueba piloto demostrativa, la cual se desarrolló en un

contexto de trabajo colaborativo real en un marco internacional. El Capítulo 6 recoge el desarrollo de dos aplicaciones específicas de carácter educativo sobre la plataforma descrita, y los resultados de las experiencias de evaluación de las mismas, que nuevamente se realizaron en contextos reales de aprendizaje colaborativo. En este caso las evaluaciones se centraron en el análisis de los parámetros de usabilidad y efectividad de la herramienta, arrojando resultados positivos en todos los casos. El proceso seguido en la investigación, el desarrollo de la plataforma y de la herramientas y las distintas evaluaciones del sistema se recogen en tres publicaciones en conferencias internacionales [82, 84, 86]. Aunque las evaluaciones resultaron positivas en todos los casos, se observó que respecto a la usabilidad del sistema, las marcas más bajas se obtuvieron en los apartados correspondientes a medir la facilidad que ofrece el sistema como herramienta que facilita el trabajo colaborativo. En conversaciones mantenidas con los alumnos participantes en las pruebas de evaluación, se concluyó que encontraron dificultad en el intercambio de información entre los distintos grupos de trabajo que formaban núcleos de aprendizaje colaborativo. En respuesta a esta problemática, se decidió implementar nuevos métodos y mecanismos que bajo el principio de las Interfaces Naturales facilitasen el intercambio de información inter núcleos. De nuevo, la aparición de una nueva problemática dio lugar a una nueva iteración en el proceso de investigación.

La última etapa de investigación presentada en este trabajo de tesis, tiene por objetivo el desarrollo de nuevos mecanismos de interacción con la información digital presente en el espacio de trabajo colaborativo distribuido, implementado por la plataforma antes descrita. El objetivo particular consiste en el desarrollo de elementos de manipulación tangibles que faciliten la manipulación de la información digital y que se integren en el modelo de espacio colaborativo distribuido ofreciendo nuevos mecanismos de intercambio de información inter núcleos. En el desarrollo de la solución se propone como contribución adicional el desarrollo de un nuevo sistema basado en manipuladores tangibles pasivos susceptibles de poder ser utilizados en dispositivos tabletop implementados mediante tecnología de marcos ópticos. Este tipo de dispositivos presenta una excelente relación prestaciones/precio, y en la actualidad se están convirtiendo en uno de los sistemas predilectos en la configuración de espacios de trabajo y aprendizaje colaborativo. Sin embargo no se conocen soluciones previas referentes a manipuladores tangibles pasivos, que no requieran de sistemas adicionales, sobre este tipo de dispositivos. En este caso, aunque se han realizado pruebas de funcionamiento, el sistema todavía no ha sido evaluado en un contexto educativo. El Capítulo 7 recoge el desarrollo del sistema y su integración en el modelo de espacio colaborativo distribuido. El trabajo dio lugar a una publicación en conferencia internacional [85]. Nuevamente, en el proceso de desarrollo de la solución se han identificado nuevas problemáticas, tales como la necesidad de desarrollar marcadores tangibles híbridos que resulten compatibles con distintas tecnologías de dispositivos tabletop, y que se recogen en el Capítulo 8 de conclusiones y trabajo futuro.

### **1.3. Estructura de la Tesis**

El documento está estructurado en un total de ocho capítulos.

El primer capítulo, de introducción, además de los objetivos y estructura de la tesis, recoge el estado del arte de la aplicación de las nuevas tecnologías gráficas interactivas en entornos educativos, así como del desarrollo de espacios de realidad mezclada, desarrollo de interfaces naturales y métodos de interacción con la información digital mediante la utilización de elementos físicos tangibles.

Adicionalmente en el primer capítulo se describen los nuevos paradigmas educativos, basados en el concepto del constructivismo, que requieren de espacios de aprendizaje colaborativo y cooperativo para su desarrollo. Las distintas herramientas y plataformas desarrolladas en este trabajo están diseñadas específicamente para ser utilizadas en este tipo de entornos de aprendizaje, en lo que las ventajas que puede llegar a aportar la tecnología pueden resultar muy beneficiosas, siempre y cuando no supongan una barrera adicional al alumno.

En el segundo capítulo, se presentan los resultados de una primera experiencia de evaluación de una herramienta de aprendizaje colaborativo basada en interfaces naturales mediante la utilización de tecnología de realidad aumentada. El objetivo de esta primera experiencia es comprobar por primera vez los efectos beneficiosos que puede tener este tipo de tecnología en el proceso educativo. De igual modo esta primera experiencia sirve para poner a prueba el propio método de evaluación, basado en los resultados obtenidos desde el punto de vista de tres parámetros: eficiencia, usabilidad y motivación.

En el tercer capítulo se presenta el desarrollo de un sistema que ofrece un interfaz natural en un concepto de espacio de realidad mezclada y computación ubicua, basado en la utilización de sistemas tabletop del tipo proyectivo desarrollados por el propio equipo de investigación y que son capaces de transformar cualquier superficie de trabajo en una superficie digital interactiva. El sistema desarrollado permite transformar los propios pupitres y superficies de trabajo de los alumnos, en superficies interactivas de forma automática y transparente cuando la información que manejan los alumnos sobre sus propias mesas así lo requiere, ofreciendo información aumentada alrededor de sus elementos físicos tradicionales de estudio o lanzando aplicaciones interactivas de apoyo a la docencia. Finalmente se presenta un conjunto de evaluaciones del sistema sobre un contexto educativo real, bajo los parámetros de eficiencia, usabilidad y motivación.

En el capítulo número cuatro, se presenta una extensión de la herramienta desarrollada en el tercer capítulo, a una plataforma genérica que implementa un modelo de trabajo y aprendizaje colaborativo y distribuido. Este modelo permite aglutinar en un mismo espacio de trabajo virtual, bajo un interfaz natural, a un conjunto de grupos de trabajo que hacen

uso de sus propios sistemas tabletop. Esta plataforma permite orquestaciones complejas de aula y de espacios de trabajo, simplificando al mismo tiempo las tareas de manejo y gestión de la información digital, así como los métodos de adición de nueva información al sistema, bajo los principios de los espacios de realidad mezclada. La herramienta permite integrar a equipos de trabajo ubicados incluso en ubicaciones remotas, que se conectan al servidor de la aplicación a través de la red. Finalmente se presentan los resultados de una primera prueba piloto sobre un proyecto de diseño industrial colaborativo que se desarrolla en un marco internacional.

El quinto capítulo recoge el desarrollo de herramientas de trabajo y aprendizaje colaborativo específicas bajo la plataforma descrita en el capítulo número cuatro. En particular se presenta el desarrollo y evaluación de una aplicación para la generación de mapas conceptuales bajo el modelo espacio de trabajo colaborativo y distribuido. La evaluación se realiza sobre un conjunto de estudiante de educación secundaria. Por otra parte se presenta el desarrollo en las mismas condiciones de una herramienta específica para el fomento de la creatividad y su evaluación en un entorno educativo formado por estudiantes de Ingeniería Técnica en Diseño Industrial.

En el sexto capítulo se presenta el desarrollo de un novedoso concepto de manipuladores tangibles, adaptados a su utilización en sistemas tabletop implementados mediante tecnología de marco óptico. Este tipo de sistemas tabletop se está popularizando rápidamente debido a que ofrecen una excelente relación prestaciones/precio. Los manipuladores tangibles desarrollados suponen una solución totalmente pasiva, no requiere de hardware adicional ni de alimentación externa, y económica, ofreciendo al mismo tiempo una buena precisión y velocidad de respuesta. En el trabajo se describe el desarrollo de una capa intermedia de software (middleware) que a partir de la información arrojada por el interfaz del propio marco óptico, es capaz de detectar, identificar y obtener las posiciones y orientaciones de los distintos manipuladores dispuestos sobre el tabletop, encapsulando esta información en tramas del protocolo estándar TUIO, garantizando una alta compatibilidad del sistema.

Adicionalmente se propone una solución de híbrida que combina los manipuladores pasivos sobre marcos ópticos con marcas fiduciales que permite utilizarlos de manera simultánea en sistemas tabletop del tipo proyectivos. Por último se describe su incorporación al modelo de espacio colaborativo distribuido, aumentando las capacidades del mismo desde el punto de vista de los interfaces naturales y de los espacios de realidad mezclada.

Por último el séptimo capítulo corresponde a las conclusiones y objetivos alcanzados en el presente trabajo de Tesis.

## **1.4.- Lista de publicaciones vinculadas a la realización de la Tesis Doctoral**

### **2011**

Salvador-Herranz, G., Pérez-López, D., Ortega, M., Soto, E., Alcañiz, M. and Contero, M. (2011). Tabletops for collaborative learning: a case study on geometry learning at the primary school. Proceedings of the 9th International Computer-Supported Collaborative Learning Conference (CSCL), vol. 2, pp. 841–845.

### **2012**

Salvador-Herranz, G., Pérez, D., Ortega, M., Soto, E., Alcañiz, M. and Contero, M. (2012). Evaluation of an augmented reality enhanced tabletop system as a collaborative learning tool: a case study on mathematics at the primary school. Eurographics 2012 - Education Papers. DOI:10.2312/conf/EG2012/education/009-016

### **2013**

Salvador-Herranz, G., Contero, M. and Dorribo-Camba, J. (2013). Management of distributed collaborative learning environments based on a concept map paradigm and natural interfaces. Proceedings of the 43rd IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), pp. 1486–1491. DOI:10.1109/FIE.2013.6685084

Salvador-Herranz, G., Pérez-López, D., Ortega, M., Soto, E., Alcañiz, M. and Contero, M. (2013). Manipulating virtual objects with your hands: a case study on applying desktop augmented reality at the primary school. Proceedings of the 46th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), pp.31-39. DOI:10.1109/HICSS.2013.390.

Salvador-Herranz, G., Baño, M., Pérez-López, D. and Contero, M. (2013). A distributed collaborative learning tool based on a conceptual map paradigm and natural interfaces applied to the case of product design studies. Proceedings of the Research in Engineering Education Symposium (REES), pp. 165–171.

### **2014**

Candela, E.S., Pérez, M.O., Romero, C.M., López, D.C.P., Salvador-Herranz, G., Contero, M. and Alcañiz, M. (2014) HumanTop: a multi-object tracking tabletop. Multimedia Tools and Applications. 70(3):1837–1868.

Salvador-Herranz, G., Baño, M., Contero, M. and Camba, J. (2014). A collaborative design graphical tool based on Interactive Spaces and Natural Interfaces: A case study on an international design project. Proceedings of the 2014 IEEE 18th International

Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), pp. 510–515. DOI:10.1109/cscwd.2014.6846897

Salvador-Herranz, G., Contero, M. and Camba, J. (2014). Use of tangible marks with optical frame interactive surfaces in collaborative design scenarios based on blended spaces. *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*. Springer. pp 253–260. DOI:10.1007/978-3-319-10831-5\_37





## **2. ESTADO DEL ARTE EN LA UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS GRÁFICAS INTERACTIVAS EN ENTORNOS EDUCATIVOS Y PARADIGMAS DE APRENDIZAJE COLABORATIVO**

Los continuos avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ofrecen un mundo de posibilidades para los espacios de aprendizaje constructivista [96]. Nuevos y cada vez más poderosos medios audiovisuales e interactivos aportan importantes dosis de realismo a las aulas, Internet ofrece la inmediatez de la información y el desarrollo de las redes sociales favorece el trabajo en equipo y colaborativo.

Particularmente las técnicas gráficas basadas en Realidad Virtual y Realidad Aumentada resultan especialmente indicadas como herramientas de apoyo a la docencia fundamentadas en estos nuevos paradigmas educativos., ofreciendo un grado superior de realismo gracias a la inmersión del sujeto en la recreación virtual de espacios y objetos virtuales.

Del mismo modo nuevos dispositivos y nuevos modos de interacción e interfaces hombre-máquina facilitan la integración de estos nuevos paradigmas en los entornos docentes. Estos nuevos dispositivos e interfaces se agrupan bajo el nombre de “Human Centered Interfaces (HCI)”, y su principal objetivo es ocultar al máximo la complejidad de la tecnología, ofreciendo al usuario interfaces naturales que resultan intuitivos en su manejo y en muchos casos no precisan de ningún entrenamiento previo.

Superficies multitáctiles e interfaces tangibles son dispositivos que responden a esta forma de trabajo, y se muestran como una prometedora tecnología aplicable a la docencia, capaces de mejorar e incrementar el grado de interés y motivación en los estudiantes, ofreciendo espacios físicos de trabajo colaborativo que a su vez están conectados al universo de las tecnologías TIC.

## **2.1.- Realidad Virtual**

Podemos definir la Realidad Virtual como un sistema tecnológico que pretende simular las percepciones sensoriales de forma que el usuario las tome como reales. Para ello se define lo virtual como algo que percibimos pero que no se corresponde con la realidad en ese espacio-tiempo (espejismo, grabación virtual, película...). Para que un usuario perciba algo virtual como real necesitaremos una interfaz que lo simule en tiempo real y le permita interactuar con él a través de múltiples canales sensoriales (visión, audición, tacto, olor, gusto).



*Figura 4:* Cascos de Realidad Virtual "Oculus Rift" y manipuladores 3D (izquierda).  
Ejemplo de sistema CAVE (derecha).

El objetivo último de la realidad virtual es crear, almacenar y simular un mundo alternativo, modelar objetos en él, definir relaciones entre ellos y la forma en la que interactúan, para que el usuario pueda más tarde percibirlo.

La Realidad Virtual se puede clasificar en dos grupos principales: inmersiva y no inmersiva.

Los métodos inmersivos de Realidad Virtual (Figura 4) con frecuencia se relacionan a un ambiente tridimensional creado por un ordenador, el cual se visualiza y manipula a través de cascos, guantes u otros dispositivos que capturan la posición y rotación de diferentes partes del cuerpo humano.

En el caso extremo el usuario pierde el contacto con el mundo real al percibir únicamente los estímulos del mundo virtual. Estas experiencias inmersivas se pueden recrear mediante cascos de realidad virtual (Head Mounted Displays, HMD), o bien en entornos simulados mediante proyección o retroproyección, como es el caso del sistema

CAVE <sup>1</sup> (Computer Assisted Virtual Environment). Guantes interactivos, punteros 3D, sonido 3D, etc..., refuerzan la sensación de inmersión al implicar a un mayor número de sentidos.

Los métodos no inmersivos, más sencillos, recrean mundos virtuales mediante simulación gráfica por ordenador con los que se puede interactuar pero sin estar sumergidos en los mismos. Estos métodos resultan muy comunes en videojuegos ya que no requieren de ningún hardware especial.

Muchos trabajos de investigación han destacado las posibilidades que ofrece la Realidad Virtual como herramienta educativa, capaz de adaptarse a los métodos de enseñanza y aprendizaje preferidos por los estudiantes.

Richard M. Felder y Linda Silverman desarrollaron en su trabajo "Learning and Teaching Styles in Engineering Education" [22] un esquema de clasificación en el cual se disponen los métodos de aprendizaje/enseñanza preferidos por los estudiantes/profesores en cinco escalas diferentes, o dimensiones (Tabla 1).

<u>Sensory</u> / <b>Intuitive</b> :	Sensors prefer facts, data, and experimentation, are careful and patient with detail, but may be slow. Intuitors prefer concepts, principles, and theories, and may be quick but careless.
<u>Visual</u> / <b>Verbal</b> :	Visual learners prefer pictures, diagrams, charts, movies, demonstrations, and exhibitions. Verbal learners prefer words, discussions, explanations, formulas, and equations.
<u>Inductive</u> / <b>Deductive</b> :	Inductive learning develops principles and generalities from observations, the natural human learning approach. Deductive development starts with governing principles and then develops applications, the natural teaching approach.
Active / Reflective:	Active learners learn by doing and participating. Reflective learners learn by thinking or pondering introspectively. Unfortunately, most lectures provide opportunity for neither approach (passive ).
<b>Sequential</b> / Global:	Sequential learners take things step by step, and will be partially effective with partial understanding. Global learners must see the whole picture for any of it to make sense, and are completely ineffective until they suddenly understand the entire subject.
<u>Underlined</u> :	Preferred by most engineering students.
<b>Bold Face</b> :	Preferred by most engineering professors.

Tabla 1: Dimensiones propuestas por Felder y Silverman como Estilos de Aprendizaje.

Las conclusiones de su trabajo demostraron que en general no coinciden los métodos de enseñanza preferidos por los profesores con los métodos de aprendizaje óptimos preferidos por los estudiantes, que en el caso de este trabajo en su mayoría se trataba de alumnos de alguna Ingeniería.

<sup>1</sup> El primer entorno de realidad virtual CAVE fue creado por científicos de la Universidad de Illinois (Chicago), en el Electronic Visualization Laboratory en 1992.

En general dedujeron, que la mayoría de estudiantes prefieren procesos de aprendizaje “sensoriales”, “visuales”, “inductivos” y “activos”. Sin embargo la mayoría de clases que reciben suelen basarse en métodos “intuitivos”, “verbales”, “deductivos” y “pasivos”.

Posteriores trabajos de John T. Bell y H. Scott Fogler [3, 4] presentan a la Realidad Virtual como una herramienta eficaz de enseñanza, capaz de ajustarse casi a la perfección a las cinco dimensiones propuestas por Felder y Silverman y en particular a las preferidas por los estudiantes.

En su trabajo defienden las considerables mejoras que presentan los métodos basados en Realidad Virtual frente a los basados únicamente en contenidos multimedia, debido a que aumentan el grado de participación del alumno y el grado de inmersión.

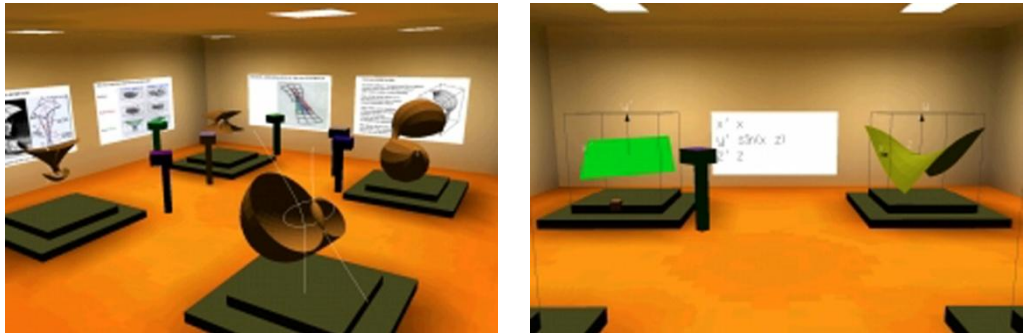
Para ello desarrollaron un entorno de Realidad Virtual aplicado al caso particular de la enseñanza de química en estudiantes tanto de secundaria como universitarios. La respuesta de los estudiantes fue en la gran mayoría de los casos satisfactoria, reconociendo que la simulación resultaba más precisa, completa y permitía un mayor entendimiento de los procesos que se explicaban. La mayoría de estudiantes resaltaron que las lecciones impartidas según este método les resultaban más comprensibles y más fáciles de retener en la memoria. De las encuestas presentadas a los alumnos también se extrae la capacidad de la Realidad Virtual de convertir en “tangible” lo “intangible” y de este modo facilitar la comprensión de ciertas ideas que por su naturaleza resultan abstractas y difíciles de comprender por métodos tradicionales.



*Figura 5: Muestras del entorno de Realidad Virtual inmersivo, basado en CAVE, propuesto en "Learning and Building Together in an Immersive Virtual World" [78].*

También desde el punto de vista de la Realidad Virtual en [78] los autores presentan un entorno virtual (Figura 5) basado en un sistema CAVE, especialmente diseñado para niños de 6 a 10 años y fundamentado en las teorías didácticas del constructivismo y la

exploración. El objetivo principal de los investigadores era explorar la realidad virtual como un medio de aprendizaje.



*Figura 6: Muestras del entorno de Realidad Virtual no inmersivo propuesto en "CyberMath: A System for Exploring Open Issues in VR-based Education" [98].*

En un interesante trabajo posterior [79], los mismos autores profundizan en la evaluación y análisis de esta herramienta, en un estado más maduro de desarrollo, siendo testado por un elevado número de usuarios, en su mayoría niños. De las experiencias los autores desprenden interesantes criterios de evaluación y análisis de la eficacia de los sistemas basados en Realidad Virtual aplicados a la docencia en niños.

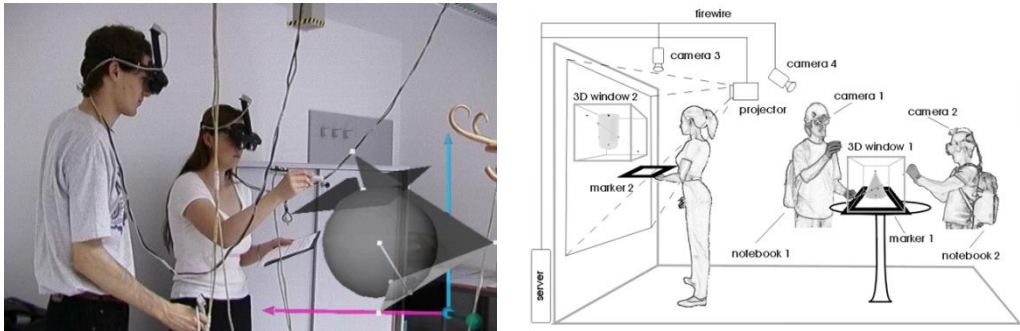
Otro ejemplo de trabajo de investigación en el que se hace uso de la Realidad Virtual como herramienta docente es el presentado en [98], que profundiza en campo de la enseñanza de matemáticas. Los autores presentan un entorno virtual compartido (Figura 6) basado en avatares diseñado para mejorar la educación en matemáticas, que la exploración y enseñanza de conceptos matemáticos cuando profesor y alumno están presentes, pero físicamente separados.

## 2.2. Realidad Aumentada

La Realidad Virtual permite la completa inmersión del individuo en el mundo virtual, pero al mismo tiempo tiene el inconveniente de la total desconexión con la realidad.

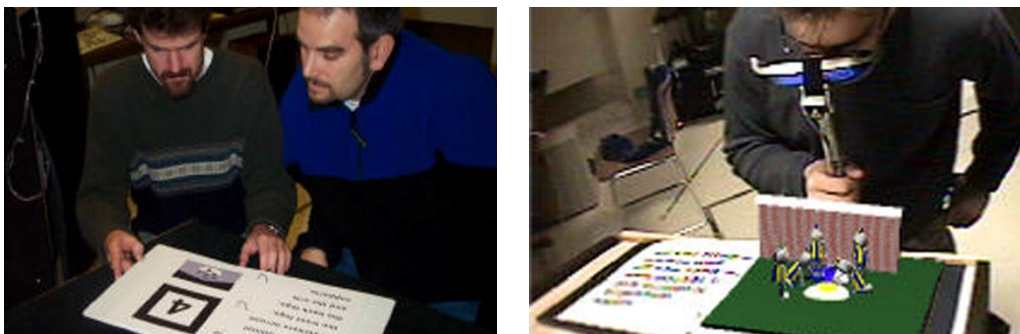
Por el contrario, la Realidad Aumentada no establece ese tipo de desconexión entre ambos mundos, sino que enriquece el entorno real con información adicional la cual se integra como si fuera auténtica en tiempo y en espacio. De este modo, habitualmente un usuario de Realidad Aumentada se siente menos desprotegido al seguir percibiendo su entorno real de forma natural.

La Realidad Aumentada también se define como herramienta potencialmente aplicable a la docencia en numerosos trabajos. En [24, 45, 46] los investigadores utilizan este tipo de interfaces como herramientas docentes aplicables a la práctica totalidad de los niveles de enseñanza (Figura 7). En sus trabajos proponen una metodología de evaluación de este tipo de herramientas aplicadas en el ámbito de la docencia, que tiene en cuenta a: estudiantes, profesores y un conjunto de observadores externos expertos en la materia.



*Figura 7: Cascos de Realidad Virtual "Oculus Rift" y manipuladores 3D (izquierda). Ejemplo de sistema CAVE (derecha).*

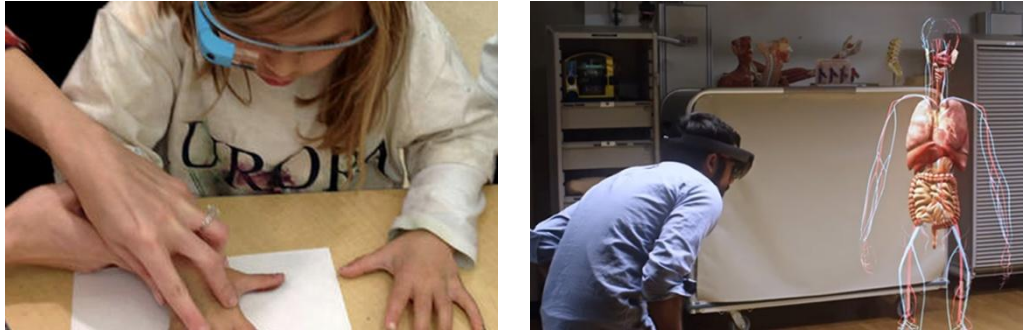
En estos trabajos se propone la Realidad Aumentada como una herramienta idónea para seguir una metodología docente fundamentada en la Teoría del Constructivismo. En [25, 65] también se encuentra una defensa en la misma línea.



*Figura 8: Ejemplo de implementación de un prototipo de "Magic Book".*

Una de las aplicaciones de la Realidad Aumentada más utilizada en la actualidad en entornos educativos gracias a su bajo coste y sencillez de implantación son los llamados Libros de Realidad Aumentada. Uno de los trabajos pioneros en esta temática es el

recogido en [7, 8], en el que se presenta mediante el proyecto que denominan “Magic Book” (Figura 8) una implementación de este concepto. Los libros de Realidad Aumentada permiten “aumentar” mediante contenidos multimedia, habitualmente mediante gráficos 3D, la información que aparece en los libros clásicos.



*Figura 9: Ejemplos de aplicación en tareas educativas de Google Glass (izquierda) y HoloLens (derecha).*

E. Woods et al. presentan un interesante estudio [105] en el que se justifican los beneficios educativos que plantea la Realidad Aumentada desde tres puntos de vista: mejora de la interpretación espacial, temporal y contextual de los contenidos. Los autores justifican que el uso de estas tecnologías mejora el aprendizaje Kinestésico, ya que los alumnos interactúan directamente con el material educativo y asocian los contenidos con movimientos o sensaciones corporales. Este tipo de aprendizaje, aunque más lento, permite comprender y recordar mejor los conocimientos adquiridos. Por último inciden en que este tipo de enseñanza mejora la capacidad explorativa de los alumnos y favorece el tipo de docencia basada en la teoría del constructivismo.

En la actualidad Google y Microsoft han desarrollado dos nuevos tipos de dispositivos de Realidad Aumentada, Google Glass y HoloLens respectivamente, que prometen un nuevo e interesante paso adelante en los usos y aplicaciones de este tipo de tecnología, particularmente en tareas educativas (Figura 9).

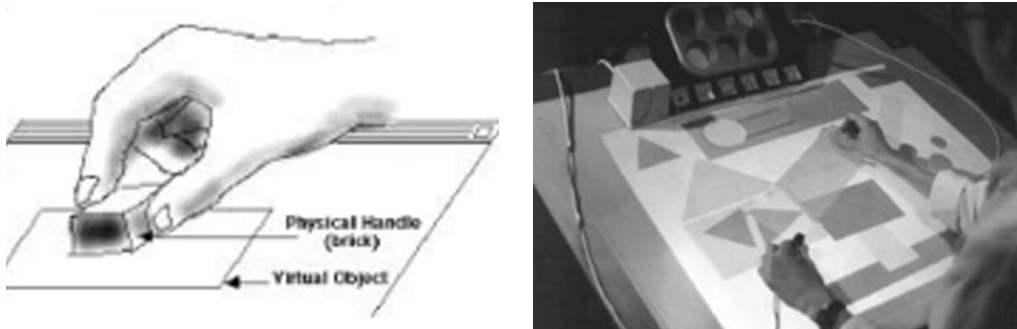
### **2.3. Interfaces interactivos ubicuos y basados en elementos tangibles**

La bibliografía también recoge experiencias en las que se detallan los beneficios de la utilización de elementos tangibles como herramientas docentes. La posibilidad de utilización de elementos físicos reales en tareas educativas siempre ha sido una posibilidad



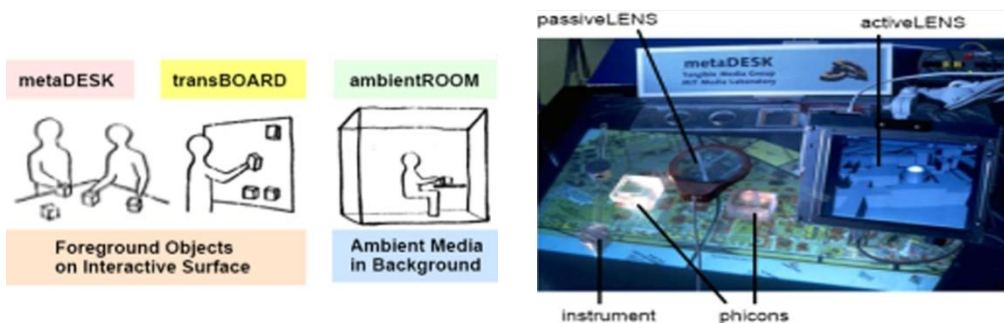
que ha interesado a profesores y formadores. María Montesori <sup>1</sup>, descubrió que los niños usaban materiales de manera espontánea, independiente, y además les prestaban mucha atención. De este modo pensó que aprender jugando con objetos físicos podría orientar la atención de los niños de forma poderosa hacia objetivos de aprendizaje determinados.

Diversos trabajos han trasladado de alguna forma esta idea al mundo de las enseñanza asistida por ordenador incorporando este tipo de elementos a nivel de interfaz.



*Figura 10: Ejemplo de objeto manipulable (izquierda). Prototipo de Interfaz de Usuario manipulable (derecha).*

Uno de los primeros ejemplos de computación tangible fue “Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces” [23]. El trabajo consistía en unos bloques (similares a bloques de LEGO®) los cuales estaban enganchados a objetos virtuales, con lo cual hacía a estos objetos manipulables (Figura 10). Los autores definen en su trabajo las propiedades de las que a su juicio debería disponer todo interfaz de usuario manipulable.



*Figura 11: Tres propuestas de plataforma de interacción de “Tangible Bits” (izquierda).*

<sup>1</sup> Maria Montessori (Chiaravalle, 1870 - Noordwijk, 1952) fue una reconocida pedagoga italiana que renovó la enseñanza desarrollando un particular método, conocido como método Montessori, que se aplicaría inicialmente en escuelas primarias italianas y más tarde en todo el mundo.

---

*Prototipo de interfaz de usuario manipulable (derecha).*

Posteriormente Ishii y Ullmer extendieron esta idea y definieron el concepto de “Bits Tangibles” [36]. Esta definición representa una aparente contradicción en cuanto que los bits, como tales, son intangibles... Sin embargo éste trabajo propone precisamente añadir esta cualidad “tangible“ a la información que maneja un ordenador, dotando de este valor añadido a los nuevos interfaces. El estudio describe tres ejemplos de uso mediante “Superficies Interactivas” y “Tabletops”, interfaces que emplean objetos físicos que se pueden coger y entornos completos donde se recrean ambientes que actúan como interfaz y que proporcionan realimentación al usuario (Figura 11).

Por su parte M. Resnic, del Mit Media Lab <sup>1</sup>, fue uno de los primeros investigadores en extender el uso de los interfaces tangibles al dominio de la educación [77]. Este trabajo fue continuado en "Extending tangible interfaces for education: digital montessori-inspired manipulatives" [107]. A partir de ese momento han surgido muchos trabajos que exploran las capacidades de los interfaces tangibles aplicados al campo de la educación.

Un interesante trabajo es el presentado por P. Marshall [53] en el que se ofrece una visión crítica de la utilización de este tipo de interfaces en educación. En las conclusiones del trabajo el autor presenta un marco analítico que desde seis puntos de vista permite evaluar la idoneidad de utilización de interfaces tangibles en tareas educativas.

La computación ubicua es entendida como la integración de la informática en el entorno de la persona, de forma que los ordenadores no se perciban como objetos diferenciados. Actualmente empieza ser conocida por el término "Inteligencia Ambiental".

Los interfaces tangibles contribuyen a la generación de espacios basados en esta tecnología, en cuanto a que tratan de esconder la complejidad de la tecnología haciendo que esta resulte transparente al usuario. La meta última de la computación ubicua consiste en desarrollar entornos transparentes de modo que el usuario pueda beneficiarse de la tecnología sin percibir que la está utilizando y de este modo evitando cualquier interferencia en los procesos que está realizando,

La utilización de tecnología en educación reporta muchas ventajas pero al mismo tiempo puede resultar una herramienta contraproducente en cuanto a que habitualmente interfiere excesivamente en el proceso educativo.

Es común que tanto profesores como estudiantes requieran de una tarea de entrenamiento previo en la tecnología antes de poderla utilizar, lo cual supone un punto de interrupción en las tareas docentes. Sin duda alguna la computación ubicua puede mejorar la integración de la tecnología en este tipo de entornos, evitando en todo momento interferencias en el proceso de aprendizaje/enseñanza.

---

<sup>1</sup> El MIT Media Lab es un laboratorio dentro de la Escuela de Arquitectura y Planificación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Fundado en 1985. Está dedicado a los proyectos de investigación en la convergencia del diseño, la multimedia y la tecnología.

El artículo "Ubiquitous computing in education: Invisible technology, visible impact" [33] recoge un extenso análisis de las posibilidades de aplicación de esta tecnología en tareas educativas.



*Figura 12: Ejemplo de Espacio de Realidad Mezclada basado en sistemas multimedia y grandes superficies interactivas multitáctiles.*

Una particularización de los interfaces ubicuos serían los denominados Espacios de Realidad Mezclada ("Blended Reality Spaces"). K. Hoshi et al. describen bien este tipo de espacios interactivos en "Designing Blended Reality Space: Conceptual Foundations and Applications" [34].

Un espacio de este tipo puede definirse como un entorno interactivo en el que se mezclan a la perfección el mundo físico y el virtual, afectándose mutuamente. Este tipo de interfaces permite el perseguido objetivo de ocultar la complejidad de la tecnología al usuario, ofreciendo modos de interacción intuitivos y naturales. Estos interfaces resultan familiares a los usuarios pues en muchos casos utilizan metáforas de funcionamiento e interacción similares a entornos tradicionales de trabajo en el mundo real.

En el trabajo "Blended Spaces for Collaborative Creativity" [5] D. Benyon y O. Mival presentan el desarrollo de un interfaz de trabajo colaborativo basado en este tipo de espacios (Figura 12). En su diseño proponen la utilización de grandes superficies interactivas multitáctiles (sistemas tabletop) a modo de mesa de reuniones, como elemento principal y cotidiano para tareas de colaboración, diseño, esquematización, etc... El sistema se completa con dispositivos de videoconferencia y otros multimedia que conforman una habitación interactiva acorde con los principios de los espacios de realidad mezclada.

---

## 2.4. Serious games

Otro campo de interés es la corriente conocida como “Serious Games”, en la que se utilizan juegos con fines didácticos persiguiendo captar y mantener la atención de los estudiantes, gracias al incremento en su motivación. Instituciones de prestigio como Massachusetts Institute of Technology (MIT) y Harvard están desarrollando en sus programas y grupos de Educación aplicaciones de Realidad Aumentada en formato de juegos; estos juegos buscan involucrar a los estudiantes de educación secundaria en situaciones que combinan experiencias del mundo real con información adicional que se les presenta en sus dispositivos móviles. En este sentido, han desarrollado juegos basados en realidad aumentada para enseñar materias de matemáticas y ciencias, todos ellos orientadas a trabajar de forma colaborativa entre los estudiantes.

## 2.5. Embodied Learning

Desde la perspectiva del “Embodied Learning” y “Embodied Cognition” también existe bibliografía que justifica su utilización como herramienta y método docente.

Cualquier proceso de aprendizaje está fuertemente influenciada por las interacciones que tienen lugar entre el cuerpo y el entorno físico [104]. Partiendo de esta afirmación es evidente que el entorno ejerce influencia en el aprendizaje cuando el sujeto está inmerso físicamente en el mismo. Aún así, varios estudios muestran que incluso en los casos en que el sujeto no se encuentra inmerso en el propio entorno que está estudiando, su imaginación juega un papel importante recreando dicho ambiente e interactuando con él mentalmente. Incluso los seres humanos podemos construir representaciones mentales de situaciones que nunca antes hemos experimentado, basándonos únicamente en las explicaciones recibidas de los demás. A modo de ejemplo, varios estudios acerca de la rotación mental de objetos tridimensionales evidencian la influencia de las relaciones interactivas con el entorno durante el proceso de aprendizaje. En [93, 94] los autores muestran que los estudiantes manejan mentalmente objetos tridimensionales virtuales de una forma similar a como lo harían en el espacio real. Otros estudios han demostrado que, en general, cuando los participantes simplemente leen un texto relacionado con determinada acción, el sistema motor se activa de forma automática para representar su significado [2, 26, 27, 75].

Parece claro, por tanto, que en la mayoría de los casos, los seres humanos adquirimos conocimiento de una mejor manera cuando estamos inmersos en el contexto, debiendo imaginarlo cuando no es así. Diversos trabajos de investigación en el área de aprendizaje multimedia, y en particular en la Realidad Virtual, se ocupan de cómo estos sistemas pueden aprovechar las capacidades del “Embodied Learning” para mejorar la adquisición

de conocimiento, proporcionando un entorno virtual que se aproxime lo mejor posible el entorno físico real, de modo que los estudiantes no tengan la necesidad de imaginarlo.

En [40] se presenta un interesante estudio en el que se utiliza un entorno semi-virtual inmersivo, llamado SMALLLab, en el que se recrean grandes espacios para que los estudiantes aprendan mediante la interacción de su propio cuerpo con el sistema, utilizando las proyecciones sobre el suelo y elementos tangibles. El diseño de actividades sobre este sistema recrea escenarios en los que el aprendizaje se consigue utilizando el movimiento del cuerpo de los estudiantes para interactuar con el entorno. La conclusión del trabajo sugiere que el uso del cuerpo resulta muy eficaz en un contexto de aprendizaje, aun cuando el concepto bajo estudio resulte abstracto.

Otro ejemplo interesante se presenta en "Learning physics through play in an augmented reality environment" [20], donde también hace uso de un gran espacio en el que los alumnos interactúan con sus propios cuerpos, en este caso en un contexto de realidad aumentada y utilizando técnicas de captura de movimiento. En el estudio, los autores muestran como los estudiantes aprenden con facilidad conceptos de física ciertamente complejos, a una edad más temprana de lo habitual. En el proyecto presentado, llamado SPASES, los estudiantes aprenden conceptos físicos como: fuerza, fricción, movimiento en dos dimensiones, velocidad, aceleración, etc., participando de una manera inmersiva con su propio cuerpo.

## **2.6. Paradigmas de aprendizaje colaborativo**

En las últimas décadas, diversas corrientes didácticas han propuesto nuevos paradigmas educativos que replantean el método clásico de docencia, todavía basado en técnicas que tienen su origen en el renacimiento.

En muchas de estas nuevas teorías, generalmente referidas como teorías constructivistas, el aprendizaje es entendido como un proceso de construcción de conocimiento, con un especial énfasis en el aprendizaje activo y auto regulado. El aprendizaje constructivista subraya la idea de considerar al alumno como un miembro activo en un contexto de aprendizaje en el que el conocimiento no se transmite directamente al alumno, sino que se construye a través de la propia actividad e interacción social.

Por lo tanto, el aprendizaje puede entenderse como un proceso activo de adquisición del conocimiento [18], en el que el estudiante es animado a construir su propio conocimiento, en base al que ya posee y a sus propios intereses.

Según estas teorías, el aprendizaje debe ser considerado como un proceso auto regulado, manejado por el propio estudiante. Según el trabajo de D. Parkins sobre la teoría del constructivismo [71], la construcción del conocimiento y la autorregulación conducen a una mejor comprensión, a recordar y a utilizar activamente los conocimientos. En la misma línea, J. A. Greene y R. Azevedo [29] demostraron en sus investigaciones que los estudiantes que hacen uso de estrategias constructivistas de aprendizaje auto regulado tienen más probabilidades de alcanzar una comprensión profunda y conceptual de temas complejos a cuando su aprendizaje se limita a una forma meramente declarativa.

Las teorías constructivistas del aprendizaje han tenido un impacto notable en la práctica de la educación en las aulas. Por ejemplo, la didáctica empleada tradicionalmente por el profesor ha pasado de utilizar métodos pasivos a promocionar un tipo de aprendizaje activo en las aulas. Pero este tipo de prácticas requieren de ambientes y orquestaciones del aula diferentes. Según M.P.Driscoll [18], los entornos de aprendizaje constructivistas deben ser complejos, realistas y deben contar con un sentido. Un entorno de estas características anima a los estudiantes a participar en la construcción de nuevos conocimientos al permitirles realizar un paralelismo con las tareas y problemas reales que surgen en la vida cotidiana, consiguiendo transformar el proceso de aprendizaje en una experiencia significativa a nivel personal, lo que contribuye a la motivación de los estudiantes en la tarea de aprender [92]. Este grado de motivación resulta esencial para alcanzar un nivel más profundo de aprendizaje [11].

Una teoría derivada del constructivismo es el Knowledge Building, la cual representa un paradigma de aprendizaje concebido para la era actual, basada en la sociedad de la información y del conocimiento. Esta teoría fue desarrollada inicialmente por Carl Bereiter y Marlene Scardamalia [89], con la intención de describir las necesidades que presenta una comunidad de estudiantes para crear conocimiento. En esta teoría se distingue entre construcción de conocimiento y aprendizaje, entendiéndose por este último un proceso interno al individuo que se traduce en cambios en creencias, actitudes y habilidades. Por el contrario según esta teoría la construcción del conocimiento se entiende como algo público, accesible para el resto de la comunidad, que a su vez lo puede utilizar para aprender y al mismo tiempo contribuir en la generación de nuevo conocimiento. La construcción del conocimiento se refiere al proceso de creación de nuevos artefactos cognitivos como resultado de objetivos comunes, grupos de discusión y síntesis de ideas.

El Knowledge Building está íntimamente relacionado con la línea del Constructivismo, puesto que esencialmente persigue la idea común de construcción de nuevo conocimiento, pero no a nivel individual sino a nivel colectivo. Por descontado un individuo se beneficia de esta generación de conocimiento colectivo en la construcción del suyo propio. A su vez el Knowledge Building requiere de otras estructuras y herramientas educativas como son: aprendizaje colaborativo, descubrimiento guiado, aprendizaje basado en proyectos, comunidades de aprendices, etc...



### **3. EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REALIDAD AUMENTADA COMO HERRAMIENTA DE APRENDIZAJE BASADA EN INTERFACES NATURALES**

Hoy en día, la falta de interés y motivación en los estudiantes hacia las prácticas académicas clásicas representa un factor clave en el fracaso escolar en la mayoría de países desarrollados. Adicionalmente es evidente la existencia de una brecha cada vez mayor entre los procedimientos de enseñanza tradicionales y la nueva forma tecnológica de vida de los estudiantes [50].

El desarrollo tecnológico a lo largo del tiempo ha permitido mejorar las técnicas docentes clásicas, ofreciendo nuevos y mejores canales de acceso a la información que redundan en mayores índices de entendimiento y comprensión por parte de los alumnos. El desarrollo de la multimedia ha supuesto en este sentido un punto determinante, permitiendo ofrecer la información de una forma mucho más rica y realista a como ha sido tradicionalmente presentada en los libros de texto y materiales didácticos.

Sin embargo, desde otro punto de vista, el uso de la tecnología también puede suponer una barrera frente al estudiante que interfiera significativamente en la evolución natural del proceso educativo. En este sentido es habitual que los estudiantes deban ser instruidos y entrenados previamente en el uso de una determinada tecnología para ser usada posteriormente en como herramienta educativa, lo cual supone una interrupción en proceso de aprendizaje además de consumir un importante y valioso tiempo.

Los avances en el desarrollo de Interfaces Naturales pueden reducir significativamente este efecto negativo. En este tipo de interfaces el esfuerzo de la comunicación entre el usuario y el computador recae en la propia tecnología, de modo que el usuario puede desarrollar su trabajo de forma una forma natural sin necesidad de aprender a utilizar métodos o técnicas específicas. Los Interfaces Naturales contribuyen por lo tanto a la creación de espacios de computación ubicuos, en los que la tecnología pasa desapercibida o resulta transparente al usuario.



Por otra parte, cuando el aprendizaje está basado en la experiencia y la observación, éste se convierte fácilmente en aprendizaje profundo. Cuantos más sentidos y emociones están involucrados, más potente es la experiencia de aprendizaje [49].

La Realidad Aumentada y los avances en nuevas tecnologías HCI (Human-Computer Interaction), tales como superficies multitáctiles, interfaces tangibles, etc..., aparecen como herramientas prometedoras que pueden ayudar a mejorar la motivación y el interés de los estudiantes, desarrollar habilidades cognitivas y en general apoyar el proceso de enseñanza y aprendizaje en contextos educativos.

En este capítulo se presenta un caso de estudio en el que se analiza la utilización de Realidad Aumentada e Interfaces Naturales como herramienta docentes capaz de generar ambientes educativos que aproximan el concepto de computación ubicua y son capaces de mejorar el interés y la motivación del alumno. El estudio se centra en etapas tempranas de la educación, donde los estímulos y el aprendizaje basado en experiencias resulta más determinante.

Los resultados de la se presentan y analizan desde el punto de vista de tres parámetros: eficiencia, motivación y usabilidad.

Se pretende validar la hipótesis inicial que consiste en que el empleo de información multimedia mediante la utilización de interfaces naturales, que esconden la complejidad de la tecnología y la hacen transparente al usuario, permiten mejorar la eficiencia del proceso de enseñanza/aprendizaje mediante un incremento en la motivación de los estudiantes.

### **3.1.- Antecedentes**

Como reflejan los resultados del informe Horizon 2011 [39], la Realidad Aumentada es una tecnología que existe desde hace décadas y que está alcanzando un nivel de madurez que en la actualidad ya la convierte en útil en distintos ámbitos de aplicación.

Sin embargo no existen demasiadas referencias que ofrezcan resultados cuantitativos en cuanto a la aplicación de esta tecnología en escenarios del sector educativo. La mayoría de los análisis se basan en estudios que utilizan desarrollos de hardware caros y exóticos, que limitan la extrapolación de resultados [45, 46, 70, 105]. Tal y como se apunta en el trabajo de Dünser et al. [19], aunque la Realidad Aumentada se lleva estudiando desde hace cerca de 40 años, no se han realizado evaluaciones formales de esta herramienta hasta hace relativamente poco tiempo. En su trabajo analizan publicaciones entre los años 1993 y 2007 referentes a Realidad Aumentada, y de sus investigaciones se desprende que únicamente alrededor de un 8% de las mismas describían algún tipo de evaluación formal.

Esto implica que desde un punto de vista de aplicación de la Realidad Aumentada en entornos educativos existe un número pequeño de publicaciones especializadas en el análisis de la herramienta desde la perspectiva de los usuarios.

El trabajo que se presenta en este capítulo, recogido en [87], pretende proporcionar datos adicionales sobre el impacto de esta tecnología en el proceso de aprendizaje, analizando la repercusión que tiene en el grado de motivación de los estudiantes y su implicación en la mejora de la eficiencia del proceso de aprendizaje. También se desarrolla un estudio para evaluar la usabilidad de esta tecnología que justifique su clasificación como Interfaz Natural, permitiendo formar parte de entornos basados en computación ubicua.

En el estudio se hace uso de una implementación de Realidad Aumentada en su versión conocida como "de escritorio" (Figura 13). Éste tipo de tecnología puede ser utilizada sobre cualquier tipo de ordenador personal equipado con una webcam, con unas prestaciones gráficas no demasiado exigentes, lo cual la convierte en una herramienta adecuada desde el punto de vista económico para ser empleada en entornos educativos reales. En este caso se hace uso de controles basados en tarjetas de cartulina con marcas fiduciales que controlan la interacción con los contenidos multimedia, mientras que la visualización es recibida en la pantalla del ordenador o bien en una pantalla de proyección.



Figura 13: Ejemplos de aplicación de la tecnología de Realidad Aumentada de escritorio.

Un motivo adicional por el que en este estudio se hace uso de la Realidad Aumentada, en particular en su versión "escritorio", deviene desde el punto de vista del grado de inmersión del usuario en mundo virtual, que en el caso de esta tecnología no es demasiado acusado. A este respecto, Liarokapis y Anderson realizan un estudio [51] sobre alumnos de Informática y Ciencias de la Información en UK, en el que se analiza el uso de Realidad Aumentada de escritorio no inmersiva frente a la utilización de tecnología inmersiva

basada en Cascos de Realidad Virtual (Head Mounted Displays, HMD) en tareas formativas. Del estudio se desprende que la opción preferida por la mayoría de estudiantes fue el empleo de tecnología de Realidad Aumentada de escritorio frente a la utilización de de sistemas más inmersivos basados en HMD.

El diseño de los contenidos educativos debe ser realizado de una forma muy cuidadosa. Mientras que algunos estudios han apuntado a que la adición de ciertos detalles seductores a materiales de instrucción, que capten la atención de los estudiantes, tienen poco efecto en el proceso de aprendizaje, otros estudios apuntan lo contrario bajo ciertas condiciones cognitivas. Park et al. [67] indican que el rendimiento de aprendizaje de los estudiantes es significativamente mayor cuando estos detalles seductores se presentan bajo una condición de carga cognitiva baja (narración), pero no se observan diferencias significativas bajo ningún otro supuesto. A este respecto, un aspecto importante a ser considerado es el posible efecto de novedad asociado al uso de nuevas tecnologías. Seo et al. [91] señalan que mientras el empleo de gráficos 3D resulta natural incluso en niños de corta edad (debido a su exposición a videojuegos), los contenidos basados en Realidad Aumentada si resultan muy llamativos (al menos por ahora). Esta cuestión es importante, debido a la dificultad en diferenciar el efecto causado por el factor novedad de los verdaderos resultados obtenidos por el uso de esta tecnología en las tareas educativas.

### **3.2.- Aplicación de Realidad Aumentada y desarrollo de contenidos didácticos**

La aplicación de realidad aumentada, denominada "Realitat 3", y los contenidos empleados en la evaluación del sistema han sido desarrollados en LabHuman<sup>1</sup>. Tanto la aplicación como los contenidos han sido ideados para ser utilizados como una herramienta de apoyo al profesor en sus explicaciones, y al mismo tiempo como un recurso para los estudiantes, que los pueden utilizar para el aprendizaje individual, y también como marco común para las actividades en equipo. De acuerdo con los recursos y equipos disponibles en las escuelas, es posible desarrollar diferentes tipos de actividades en torno a estos contenidos.

El sistema desarrollado consiste en un motor de realidad aumentada y seis aplicaciones que se ejecutan sobre él: esqueleto, ciclo del agua, desarrollo de la planta, metamorfosis de la rana, sistema solar y los sentidos. Todas las aplicaciones comparten el mismo formato de pantalla (Figura 14), facilitando la inclusión de futuros nuevos contenidos. Todas disponen de un conjunto de iconos en la parte superior derecha que proporcionan

---

<sup>1</sup> LabHuman (Laboratorio de Tecnologías Centradas en el Humano) es un laboratorio público, científico y tecnológico, que es parte del Instituto Interuniversitario de Investigación en Bioingeniería y Tecnología Orientada al Ser Humano (I3BH) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

funcionalidades básicas. Se trata de herramientas comunes, tales como modificar el nivel del zoom del modelo 3D que aparece sobre la marca fiducial, activar/desactivar la reproducción de audio, etc...

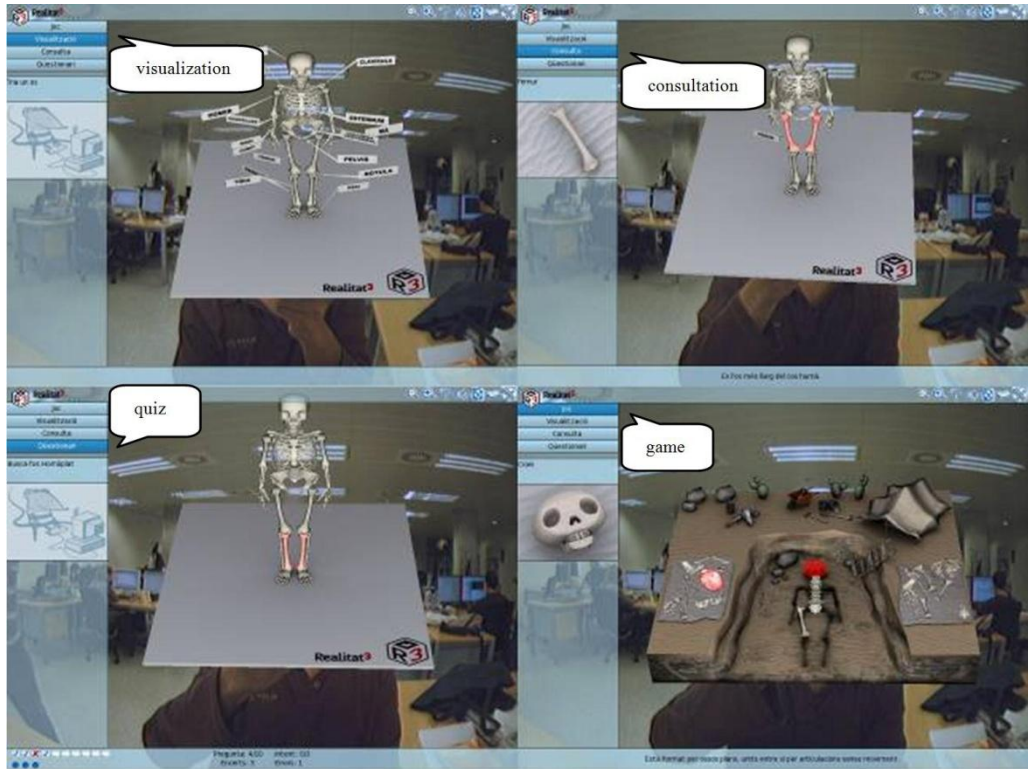


Figura 14: Muestras del interface de Realidad Aumentada de la aplicación "Realitat 3": visualización (superior-izquierda), consulta (superior-derecha), cuestionario (inferior-izquierda) y juego (inferior-derecha).

El lado izquierdo de la pantalla se reserva a la inclusión de menús que cambian acorde a los contenidos. De esta manera, en un contenido animado, éstos menús muestran controles de la animación (inicio, siguiente paso, etc...) mientras que en un contenido no animado éstos menús dan acceso a las diferentes actividades: "Juego", "Visualización", "Consulta" y "Cuestionario".

La Figura 14 muestra, a modo de ejemplo, una de las aplicaciones educativas de Realidad Aumentada desarrolladas, concretamente la asociada al aprendizaje de las partes que forman el esqueleto humano. La aplicación se divide en cuatro actividades principales.

La primera de ellas, "Juego", simula una excavación arqueológica que aparece una marca fiducial. El objetivo del juego consiste en colocar un conjunto de huesos que alguien ha desenterrado en su lugar original. La forma de hacerlo es haciendo clic con el

ratón sobre el hueso seleccionado y posteriormente en la parte correcta de la silueta. Adicionalmente, cuando el usuario selecciona un hueso, se muestra una imagen con información del mismo en el lado izquierdo de la pantalla.

La segunda actividad, "Visualización", muestra un esqueleto humano completo en 3D sobre la marca fiducial, mostrando los nombres de los huesos más importantes mediante flechas y texto. Cada flecha señala el hueso al que hace referencia. Mediante el uso de la aplicación el usuario puede observar todos los huesos del esqueleto desde cualquier ángulo, lo que permite facilitar la explicación al maestro y la comprensión del estudiante. La aplicación también proporciona información adicional sobre cada hueso en particular haciendo clic con el ratón sobre él. Esta información se presenta en la parte inferior de la pantalla mediante un texto explicativo y en la izquierda de la pantalla mediante una vista detallada 2D.

La tercera actividad, "Consulta", ofrece la posibilidad al profesor de realizar preguntas a sus estudiantes acerca de la lección. Esta actividad puede usarse de forma individual por el alumno en su propio PC o por varios alumnos al mismo tiempo sobre una pizarra digital interactiva (PDI). En ambos casos, el profesor pregunta a los alumnos acerca de un hueso y ellos deben hacer clic con el ratón (o toque en la PDI) en la posición correcta del esqueleto.

La cuarta y última actividad, "Cuestionario", permite a los estudiantes autoevaluar su aprendizaje. El sistema indica al usuario diez huesos que debe localizarlos en el esqueleto.

### **3.3.- Arquitectura del Software**

El sistema ha sido desarrollado íntegramente utilizando el motor gráfico OGRE y un conjunto de bibliotecas públicas, tales como OIS para la gestión de los dispositivos de entrada, Audiere para la gestión de los flujos de sonido, TinyXML para gestionar archivos de configuración XML, v4l2 para captura vídeo desde una cámara web en Linux, MyGUI para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario y OpenCV para el desarrollo del motor de Realidad Aumentada bajo Linux. Este motor de Realidad Aumentada, denominado HUMANAR, ha sido íntegramente desarrollado en LabHuman y se describe en [57].

HUMANAR es una biblioteca software escrita en lenguaje C y C ++, que utiliza técnicas de visión por ordenador para calcular la posición y orientación real de la cámara en relación a un marcador en el mundo real. Este método se puede dividir en tres partes: calibración de la cámara, detección del marcador y cálculo de la posición y la orientación del marcador (pose).

---

La calibración de la cámara consiste en la determinación de los parámetros intrínsecos de la cámara y los parámetros de distorsión. Para tal fin el sistema emplea capturas planas de patrones binarios ajedrezados y el método propuesto por Zhang [106].

La detección del marcador consiste en la binarización del frame capturado por la cámara mediante el empleo de una técnica basada en umbrales adaptativos [72], con el fin de encontrar el contorno del marcador del cual se deben posteriormente extraer la información de identificación, así como la posición y orientación del marcador en espacio 3D.

En un siguiente paso se aíslan en la imagen del frame capturado las regiones de pixels negros, de las cuales se extrae su perímetro en la forma de cadena de pixels contiguos. Una vez localizados estos perímetros para cada uno de ellos se aproxima su contorno mediante el menor número de segmentos de recta que optimiza el ajuste al perímetro. Si el polígono resultante presenta un tamaño mínimo, de acuerdo a un umbral previamente prefijado, y el número de lados es igual a cuatro, es considerado como un candidato a ser un marcador y pasado a la siguiente fase de identificación.

Para obtener una estimación de la pose del marcador se utiliza el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LMA) [59]. Se trata de un algoritmo de optimización que provee una solución numérica al problema de minimizar una función, generalmente, no lineal dentro de un espacio de parámetros de la función. Dichos problemas de minimización aparecen, especialmente, al ajustar mínimos cuadrados lineales y no lineales.

### 3.4.- Evaluación del Sistema

Para analizar el impacto de la herramienta Realitat3 sobre el proceso de aprendizaje, se seleccionaron tres parámetros a ser estudiados: eficiencia (rendimiento académico), usabilidad y motivación.

La **eficiencia** se evaluó desde el punto de vista de la asimilación de nuevos conocimientos. El grupo bajo estudio estuvo formado por 21 estudiantes, 12 chicos y 9 chicas, de tercer curso de educación primaria. Para la experiencia se analizaron diez unidades temáticas de la materia "Conocimiento del Medio" (cada unidad temática necesita aproximadamente dos semanas para ser completada, y el año académico completo está organizado en catorce unidades temáticas, de las que se obtuvieron datos sobre las diez primeras).

El profesor utilizó la herramienta para dar soporte a sus explicaciones en las unidades temáticas 6 y 7 concretamente en las temáticas relacionadas con la metamorfosis de la rana

y el ciclo del agua (figura XXX). Por su parte los estudiantes utilizaron en estas unidades la aplicación sobre una pizarra interactiva.

	Unidad Temática	Calificación media	Desviación estándar
#1	El cuerpo humano	6.0	2.4
#2	Una dieta saludable	6.3	2.0
#3	Los cinco sentidos	5.2	2.4
#4	Clasificación de los animales	7.1	1.8
#5	Las plantas	7.9	1.2
#6	<b>Los seres vivos y su entorno</b>	<b>8.0</b>	<b>1.3</b>
#7	<b>El ciclo del agua en la Tierra</b>	<b>8.2</b>	<b>0.9</b>
#8	Los paisajes	6.0	2.2
#9	Viviendo juntos: pueblos y ciudades	6.4	1.6
#10	En el trabajo: de la agricultura a la industria	5.2	2.3

*Tabla 2: Unidades Temáticas bajo estudio y calificaciones obtenidas. En negrita en las que se utilizó Realidad Aumentada (#6 y #7)*

Para la evaluación se utilizó un esquema de diseño cuasi-experimental basado en series temporales interrumpidas.

Los resultados muestran que las dos unidades temáticas en las que los estudiantes obtuvieron mejores calificaciones (en una escala de 0 a 10) coinciden con aquellas en las que la herramienta Realitat3 fue utilizada, tal y como se muestra en la (Tabla 2) y en la (Figura 15).

Aunque no aparece una diferencia estadística significativa con otras unidades en las que los alumnos obtuvieron altas calificaciones, los profesores participantes expresaron que bajo su punto de vista la utilización de Realidad Aumentada realmente sí tuvo un impacto positivo en las clases.

Para evaluar la **usabilidad** y el grado de **satisfacción** de los estudiantes, se utilizó un cuestionario (Tabla 3) con una escala Likert de cinco niveles [17]. Las cuestiones QU1-QU5 evalúan la usabilidad, mientras que las cuestiones QS1-QS5 evalúan la satisfacción. Este cuestionario se pasó a los estudiantes al término de las clases en las que se utilizaron contenidos de Realidad Aumentada.

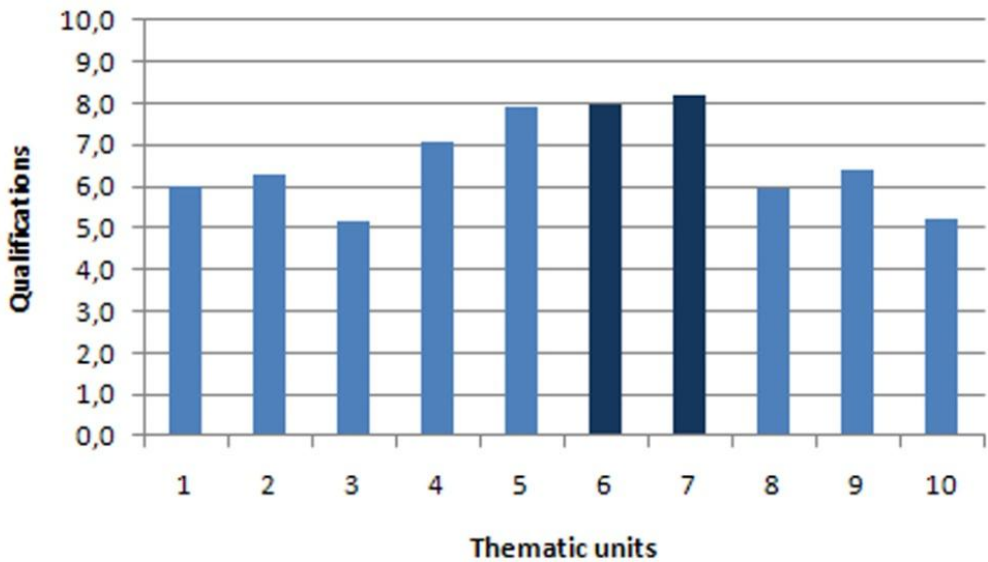
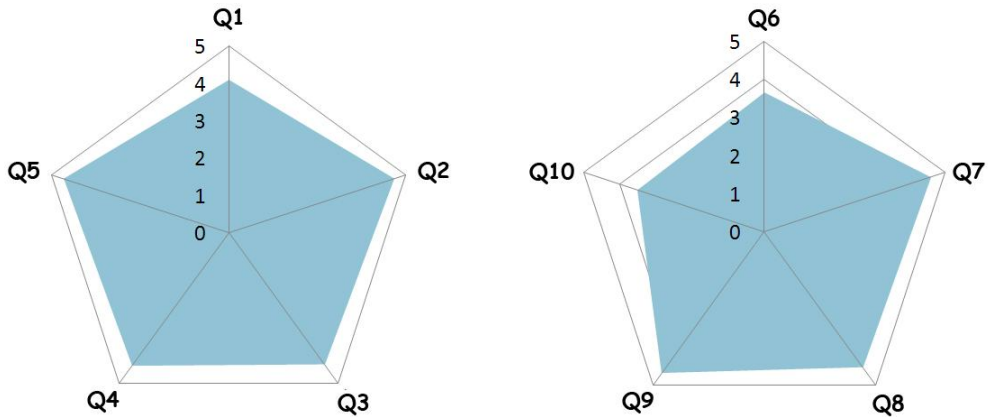


Figura 15: Calificaciones medias por unidades temáticas. En las unidades 6 y 7 se utilizaron contenidos de Realidad aumentada.

Q#	Cuestión	Puntuación media	Desviación estándar
QU1	Prefiero utilizar el libro clásico a los nuevos materiales (valor invertido)	4.1	0.94
QU2	Me ha resultado fácil manejar los objetos y entornos 3D con esta tecnología	4.7	0.66
QU3	Creo que este material me ayudará a hacer mejor los exámenes	4.4	0.97
QU4	Me ha resultado fácil utilizar este material	4.4	0.87
QU5	Me gustaría utilizar este material en casa	4.7	0.7
QS1	En esta clase he prestado mayor atención que en otras clases	3.7	1.02
QS2	Esta clase me ha parecido útil e interesante	4.6	0.59
QS3	Me gustaría tener más clases como estas	4.4	1.08
QS4	Es fácil seguir las explicaciones del profesor en las clases de este tipo	4.6	0.50
QS5	En las clases de este tipo me he sentido mejor que en otras clases	3.5	0.81

Tabla 3: Cuestionarios de usabilidad y satisfacción.





*Figura 16: Representación gráfica de los resultados del test de usabilidad (izquierda) y satisfacción (derecha) para el Centro -1.*

La evaluación de la **motivación** se realizó mediante un Inventario de Motivación Intrínseca (Intrinsic Motivation Inventory, IMI) [80], desde las subescalas "competitividad", "interés" y "esfuerzo".

El esquema utilizado fue el clásico pre-test en las sesiones previas a la impartición de clases utilizando la herramienta de Realidad Aumentada como material de apoyo, y un post-test tras las sesiones en las que se utilizó el sistema (el cuestionario IMI se realizó al mismo tiempo que el de usabilidad).

La Tabla 4 muestra los cuestionarios empleados. Cada cuestión fue evaluada sobre una escala Likert de 5 niveles. Todas las cuestiones en el pre-test estaban relacionadas con las cuestiones del post-test en el mismo orden. A modo de ejemplo, la cuestión del pre-test "Creo que soy bueno/a aprendiendo en clase", es equivalente a la cuestión del post-test "Creo que soy bueno/a aprendiendo en clase con Realitat3".

Considerando una muestra compuesta por varias observaciones sobre los mismos individuos en diferentes instantes de tiempo, donde se asume una distribución normal inicial de los datos, habitualmente se realiza una prueba t de Student para datos relacionados sobre los resultados de los dos test, con un intervalo de confianza del 95% ( $\alpha = 0.05$ ).

Sin embargo, para prevenir el problema de las comparaciones múltiples (también conocido como el problema de las pruebas múltiples), se utilizó una corrección de Bonferroni, teniendo en cuenta que cada criterio (competencia, interés y esfuerzo) es evaluado usando al menos cinco cuestiones. Por lo tanto finalmente se utilizó un  $\alpha_i = 0.01$  para prevenir errores.

<b>Escala IMI</b>		<b>Cuestiones PRE-TEST</b>
Competencia	Q1	Creo que en soy bueno/a aprendiendo en la escuela
	Q2	Creo que me va muy bien en la escuela, en comparación con mis compañeros.
	Q3	Estoy satisfecho/a con mi rendimiento en la escuela.
	Q4	Creo que me puedo considerar hábil en las tareas de la escuela.
	Q5	Creo que soy muy buen/a alumno/a.
Interés	Q6	Creo que la escuela es bastante agradable
	Q7	Creo que la escuela es muy interesante
	Q8	Creo que la escuela es divertida
	Q9	A menudo pienso sobre lo bien que lo paso en la escuela
	Q10	Creo que la escuela es aburrida
Esfuerzo	Q11	En la escuela lo hago lo mejor que puedo
	Q12	Trabajo muy duro para hacerlo bien en la escuela
	Q13	Es importante para mi trabajar bien en la escuela
	Q14	Dedico mucho esfuerzo en las tareas de la escuela

<b>Escala IMI</b>		<b>Cuestiones POST-TEST</b>
Competencia	Q1	Creo que en soy bueno/a aprendiendo con el nuevo sistema.
	Q2	Creo que he utilizado el nuevo sistema muy bien, en comparación con mis compañeros.
	Q3	Estoy satisfecho/a con mi rendimiento utilizando el nuevo sistema.
	Q4	Creo que me puedo considerar hábil en el manejo del nuevo sistema.
	Q5	Creo que he sido muy buen/a alumno/a mientras he estado utilizando el nuevo sistema.
Interés	Q6	Creo que el trabajo utilizando el nuevo sistema es bastante agradable.
	Q7	Creo que la utilización del nuevo sistema es muy interesante.
	Q8	Creo que las sesiones de trabajo con el nuevo sistema han sido divertidas.
	Q9	A menudo pienso sobre lo bien que lo he pasado aprendiendo con el nuevo sistema.
	Q10	Creo que las sesiones de trabajo con el nuevo sistema han sido aburridas.
Esfuerzo	Q11	En las sesiones de trabajo con el nuevo sistema lo he hecho lo mejor que he podido.
	Q12	He trabajado muy duro mientras he trabajado con el nuevo sistema.
	Q13	Ha sido importante para mi trabajar bien mientras he estado usando el nuevo sistema.
	Q14	He dedicado mucho esfuerzo mientras he trabajado con el nuevo sistema.

Tabla 4: Cuestionarios para el test de Motivación Intrínseca.

Escala IMI		Pre-Test	Post-Test	t
		Media (desv. est.)	Media (desv. est.)	Student
Competencia	Q1	4.11 (0.69)	4.36 (0.87)	1.37
	Q2	3.39 (0.74)	3.50 (0.69)	0.50
	Q3	3.89 (0.74)	4.39 (0.92)	2.32
	Q4	3.96 (0.74)	4.39 (0.74)	2.12
	Q5	3.89 (0.63)	4.11 (0.69)	1.03
Interés	Q6	3.75 (0.84)	4.79 (0.63)	4.96
	Q7	3.54 (0.88)	4.68 (0.72)	4.88
	Q8	3.46 (0.84)	4.82 (0.39)	8.26
	Q9	3.64 (0.87)	4.79 (0.42)	5.61
	Q10	2.50 (0.75)	1.18 (0.55)	7.73
Esfuerzo	Q11	4.32 (0.55)	4.61 (0.69)	1.76
	Q12	4.29 (0.46)	4.89 (0.31)	5.10
	Q13	4.61 (0.50)	4.43 (0.63)	1.30
	Q14	4.36 (0.68)	4.64 (0.56)	1.98

*Tabla 5: Resultados de la prueba t-Student sobre el cuestionario de motivación. Valor crítico de t:2.85 (test de dos colas)*

Finalmente se realizó un análisis final de los resultados arrojados en los pre-test y post-test. De acuerdo a la información anterior, la hipótesis alternativa significa que la evaluación de cada comportamiento es mejor en el post-test que en el pre-test. Por el contrario la hipótesis nula supone que las diferencias observadas en las valoraciones son debidas únicamente al azar.

La Tabla 5 recoge los resultados del t-test, en la que se muestran los valores medios y desviaciones estándar de las valoraciones de los alumnos en los pre-test y post-test, así como el tamaño del efecto [15]. Un tamaño del efecto entre 0.2 y 0.3 es habitualmente considerado como "pequeño" efecto, alrededor de 0.5 "mediano" efecto y por encima de 0.8 un "gran" efecto. Por su parte, la columna "t Student" recoge el valor del estadístico t que permite discernir entre aceptar o rechazar la hipótesis alternativa.

Si el valor de estadístico t está dentro del intervalo de confianza, el cual se establece en 2.85 (prueba de dos colas, incluyendo la corrección de Bonferroni), la hipótesis nula es aceptada y por lo tanto no existe diferencia significativa entre las dos muestras, aceptando la hipótesis alternativa en caso contrario.

Por lo tanto, analizando los datos recopilados en la Tabla 5, se observan diferencias significativas en las cuestiones Q1, Q3 y Q4, aceptando en estos casos la hipótesis alternativa, lo que significa que las valoraciones en los post test son mejores y en general

se puede asumir una mejora en la variable "competencia". Respecto a la variable "esfuerzo" únicamente la cuestión Q13 muestra una diferencia estadísticamente significativa. Por otra parte, no se observa una mejora significativa en la variable "interés".

### 3.5.- Análisis de los Resultados y Conclusiones

En general tanto profesores como alumnos mostraron una actitud muy positiva ante la tecnología de la Realidad Aumentada, pese a ser la primera vez que la utilizaban.

El diseño cuasi-experimental empleado en el estudio sobre la eficiencia se escogió debido a las restricciones impuestas por el colegio que participó en la experiencia. Esta circunstancia implicó la imposibilidad de trabajar con un grupo de control e implementar un estudio experimental más robusto. En este sentido una de los principales debilidades de los diseños basados en series interrumpidas en el tiempo son los defectos del diseño en el control de los efectos de la historia. La principal conclusión que se pudo extraer del estudio a la vista de la Figura 15, que muestra un diagrama de barras con las calificaciones medias para cada una de las unidades temáticas, es que aquellas unidades en las que se empleó la Realidad Aumentada se comportaron muy bien con respecto al resto de unidades. Esta conclusión cualitativa se reforzada al cruzarla con las opiniones recibidas de los profesores que participaron en la experiencia. En su opinión, los contenidos basados en Realidad Aumentada causaron un positivo efecto en los alumnos. Aún así cabe la posibilidad que en el análisis se oculte la posible repercusión del efecto novedad asociado al tratarse de un primer contacto de los estudiantes y profesores con esta tecnología y también a la heterogeneidad de los contenidos de la propia materia "Conocimiento del medio".

Respecto a la evaluación de la usabilidad, tal y como muestran los resultados recogidos en la Tabla 3, los alumnos encontraron la herramienta fácil de utilizar, ofreciendo una forma de utilización y manejo muy natural. De acuerdo a los resultados, los alumnos claramente optaron por el uso de la nueva tecnología frente a formas tradicionales (el valor de QU1 se representa de forma inversa). De las cuestiones QU2 y QU4 se desprende que el uso de la tecnología les resultó fácil y transparente. Por su parte a la vista de QU3, la mayoría de alumnos reconocen que esta herramienta puede ayudarles positivamente a mejorar sus resultados, y la mayoría también muestran que les gustaría poder utilizar esta tecnología en sus propias casas (QU5).

Respecto a la evaluación de la satisfacción, los alumnos muestran un mayor grado de atención en clase, acompañado por un notable interés en la materia que está siendo estudiada. La evaluación de la cuestión QS4 resulta especialmente interesante pues en ella los alumnos reconocen que les resultó más sencillo el seguimiento de las clases en las que se empleó esta herramienta. De nuevo en este caso los comentarios de los profesores

contribuyen a reforzar los resultados desprendidos del cuestionario de usabilidad y satisfacción.

Desde el punto de vista del análisis de la motivación, los resultados son significativos en el caso de la variable "competencia", que muestra una notable mejoría, con un tamaño de efecto mayor de 1.0 para Q1, Q3 y Q4. También presenta un notable incremento la cuestión Q10, con un tamaño de efecto de 0.76, aunque en este caso no existe un valor de diferencia estadística significativo con respecto al pre-test. Es necesario reflejar que los valores obtenidos en los pre-test para las variables "interés" y "esfuerzo" resultaron bastante grandes, indicando que el grupo bajo análisis ya contaba con una actitud muy positiva y se caracterizaba por mostrar gran interés, por lo que resultó difícil incrementar estos valores que ya eran altos de partida y que en cualquier caso siguieron siendo altos. Los resultados desprendidos de la cuestión Q13, que resultan significativamente negativos, pueden ser debidos al hecho que los estudiantes sabían que su contacto con los contenidos basados en Realidad Aumentada iba a estar limitado únicamente a varias semanas del curso.

Es evidente que los procedimientos de enseñanza y aprendizaje tienen que evolucionar para tener en cuenta el modo de vida de los nativos digitales, incluso de los más pequeños. Métodos de enseñanza desfasados crean una barrera para algunos estudiantes que están acostumbrados a interactuar con aparatos y equipos tecnológicos modernos. La Realidad Aumentada puede suponer un solución muy efectiva a un reducido coste (al menos para el caso de la Realidad Aumentada de escritorio, que únicamente requiere de una webcam y el software adecuado para ser empleada con una pantalla interactiva o computador personal) con la que proporcionar a los estudiantes contenidos atractivos que les ayuden al entendimiento de conceptos complejos.

Los profesores implicados en la experiencia destacaron que aunque los contenidos didácticos soportaban únicamente un grado de interacción limitada, el mayor impacto sobre los estudiantes estuvo relacionado con la manipulación física y natural de un marcador (tarjeta de cartón con la marca fiducial de Realidad Aumentada) que controlaba el comportamiento del contenido virtual proporcionado por la aplicación. Los resultados de usabilidad y satisfacción corroboran este aspecto. También, desde el punto de vista de los profesores participantes, la manipulación física de las marcas ofrece una ventaja en la adopción de esta tecnología. La simple idea de manipular un marcador de cartón para interactuar con contenidos digitales pueden romper la barrera que supone incorporar nuevas aplicaciones educativas en las clases con profesores que cuentan en muchos casos con competencias digitales limitadas.

Los resultados obtenidos en usabilidad confirman que la Realidad Aumentada presenta un interfaz natural que esconde la dificultad de la tecnología, haciéndola transparente al usuario. Estos datos, conjuntamente con los resultados obtenidos en eficiencia y

motivación, sugieren que la Realidad Aumentada puede contribuir a la generación de espacios educativos basados en el concepto de computación ubicua en los que la tecnología, sin ser visible, contribuya y participe activamente en el proceso educativo sin interferir con él.

Mediante el caso de estudio presentado en el siguiente apartado se pretende definir una aproximación a este tipo de espacios ubicuos, integrando Realidad Aumentada con otras tecnologías, para terminar generando lo que hemos llamado en este trabajo de investigación como "Pupitre Aumentado".



## **4. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE APRENDIZAJE COLABORATIVO BASADO EN SUPERFICIES INTERACTIVAS Y ELEMENTOS TANGIBLES**

Una Interfaz de Usuario Tangible (Tangible User Interface, TUI) es una interfaz de usuario en la que una persona puede interactuar con la información digital a través de un medio físico.

Este tipo de interfaces responden bien al concepto de Interfaces Naturales puesto que permiten dar forma física a información que en origen es digital, facilitando la interacción con el usuario en la misma forma a la que está habituado en la vida real, y por lo tanto aprovechando las habilidades de las que ya dispone en la manipulación de objetos y materiales (muchas de ellas de forma refleja).

Uno de los pioneros en las interfaces de usuario tangibles es Hiroshi Ishii, profesor del Laboratorio de Medios del MIT en el que dirige el Tangible Media Group. Su particular visión de los interfaces tangibles, llamados Bits Tangibles, consiste en dar forma física a la información digital, por lo que los bits (en general los datos digitales) se convierten en manipulables y perceptibles. Su opinión es que éstos denominados "bits tangibles" se convierten en el nexo de unión perfecto entre los objetos físicos reales y la información digital.

Las Mesas Digitales Interactivas (Digital Tabletops) representan un ejemplo de este tipo de interfaces. Los usuarios interactúan con este tipo de dispositivos utilizando sus propias manos, mediante toques con los dedos, gestos y en algunos casos también mediante la manipulación de objetos físicos. Uno de los ejemplos más representativos es el sistema "reacTable" [41], un instrumento musical electrónico colaborativo dotado de una interfaz tangible basada en una mesa, e inspirado en los sintetizadores modulares de los años sesenta.





*Figura 17:* Ejemplo de Superficie Interactiva Digital que permite interactuar mediante elementos tangibles: reacTable.

Por otra parte, este tipo de dispositivos ofrecen una gran superficie interactiva y multitáctil <sup>1</sup>, que permite el trabajo simultáneo de varios usuarios sobre la misma. En este sentido, la utilización de este tipo de dispositivos resulta especialmente interesante en escenarios de trabajo colaborativo, en los cuales múltiples usuarios interaccionan e intercambiar opiniones tratando de encontrar soluciones a un problema común. La disposición de estos dispositivos en formato "mesa", permite la reunión de los usuarios alrededor de ella, los cuales pueden establecer una fluida comunicación en la forma "cara a cara", a la vez que interaccionan de forma natural con la información digital (Figura 18).

Esta particularidad invita a pensar que la utilización de este tipo de dispositivos puede resultar idónea en entornos educativos basados en la teorías Constructivistas, y en particular en aquellos basados en "Knowledge Building", donde el trabajo en equipo de los alumnos y el aprendizaje colaborativo/cooperativo es un requisito.

Tanto el aprendizaje colaborativo como cooperativo mantienen un enfoque común que trata de organizar las actividades dentro del aula para convertirlas en una experiencia social y académica.

Los estudiantes trabajan en grupo para realizar las tareas de manera colectiva. El aprendizaje de esta forma depende del intercambio de información entre los estudiantes, los cuales están motivados tanto para lograr su propio aprendizaje como para acrecentar los logros de los demás.

---

<sup>1</sup> Multitáctil es el nombre con el que se conoce a una técnica de interacción persona-computador y al hardware que la aplica. La tecnología multitáctil consiste en una pantalla táctil o touchpad que reconoce simultáneamente múltiples puntos de contacto, así como el software asociado a esta que permite interpretar dichas interacciones simultáneas.



*Figura 18:* Varios alumnos trabajando en equipo sobre una superficie digital interactiva, manteniendo una comunicación cara a cara.

En la literatura aparece reiteradamente el término aprendizaje colaborativo vs. cooperativo. Las diferencias esenciales entre estos dos procesos es que en el primero los alumnos son quienes diseñan su estructura de interacciones y mantienen el control sobre las diferentes decisiones que repercuten en su aprendizaje, mientras que en el segundo, es el profesor quien diseña y mantiene casi por completo el control en la estructura de interacciones y de los resultados que se han de obtener [66]. El aprendizaje cooperativo requiere normalmente de una división de tareas entre los componentes del grupo. Por ejemplo, el educador propone un problema e indica qué debe hacer cada miembro del grupo, responsabilizándose cada uno por la solución de una parte del problema. Sin embargo, la premisa básica de ambos paradigmas está fundada en el enfoque constructivista. El conocimiento es descubierto por los alumnos y transformado en conceptos con los que el alumno puede relacionarse. Luego es reconstruido y expandido a través de nuevas experiencias de aprendizaje. Robert E. Slaving realiza un análisis [95]

sobre los resultados de 28 pruebas de campo en clases de educación primaria y secundaria, en las que se emplearon métodos basados en aprendizaje cooperativo. Los resultados de esta investigación demuestran la utilidad de estos métodos de aprendizaje, que en general consiguen aumentar el rendimiento, las relaciones, el interés mutuo y la autoestima de los estudiantes, entre otros resultados positivos.

Otros trabajos [16, 102] analizan la utilización de computadores en espacios de aprendizaje cooperativos y colaborativos, y en particular en su relación con las teorías de aprendizaje constructivistas. En ellos se discute principalmente la forma en la que la tecnología puede influir positivamente en la mejora de las relaciones y comunicación entre los estudiantes. Sin embargo, cuando los estudiantes trabajan en equipo, pero sentados frente a un ordenador, su atención se centra en el espacio de la pantalla, lo que ha sido llamado como interacción "hombro a hombro" [73], reduciendo significativamente las posibilidades de comunicación entre los miembros del grupo y que es requerida por los métodos de aprendizaje cooperativo. Este problema puede ser solucionado mediante la utilización de mesas digitales interactivas, pues su gran superficie de trabajo, en formato "mesa", favorece la comunicación de los estudiantes en la forma "cara a cara". Diversos estudios justifican su utilización en entornos educativos. Particularmente A. Harris et al., detallan las ventajas que ofrecen este tipo de interfaces en la generación de espacios de aprendizaje basados en teorías constructivistas [30].

Todos estos estudios previos, desde distintos puntos de vista, justifican la utilización de superficies digitales interactivas como medio tecnológico capaz de aunar las ventajas propias que ofrece la tecnología con los paradigmas educativos fundamentados en teorías constructivistas que se basan en un tipo de aprendizaje colaborativo y/o cooperativo.

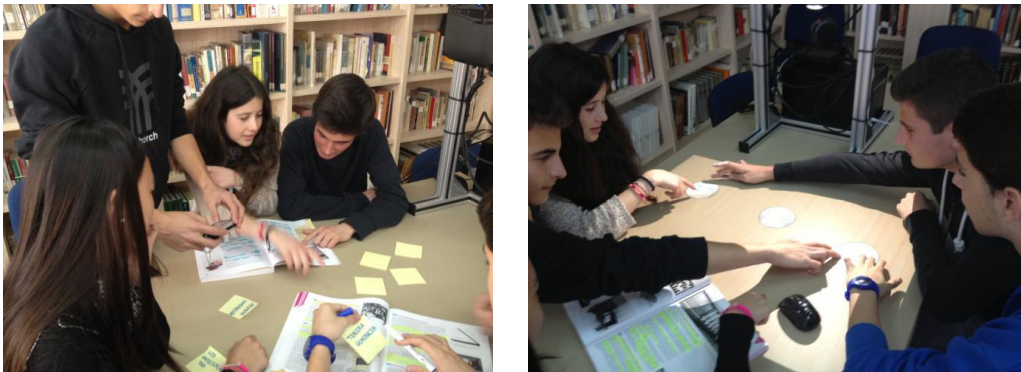
Sin embargo la tecnología puede presentar un problema en el proceso de enseñanza/aprendizaje, interfiriendo con él, si el interfaz resulta excesivamente complejo o si su utilización requiere de entrenamiento previo. En este sentido los entornos basados en computación ubicua, o aproximaciones a los mismos mediante espacios mezclados e interfaces naturales, permiten esconder la complejidad de la tecnología haciéndola transparente al usuario. En este caso, los alumnos se podrían beneficiar de las ventajas que aporta la tecnología sin que esta interfiriera en el proceso de aprendizaje al pasar desapercibida. Los sistemas que basan la interacción en la manipulación de objetos físicos reales, contribuyen a la generación de este tipo de espacios, al presentar metáforas de uso al usuario que hacen de la interacción con la tecnología algo natural y cotidiano. Trabajos tales como los presentados por Resnik et al. [77] y O'Malley [64], confirman los beneficios de su aplicación en tareas de aprendizaje en etapas tempranas. Falcao y Price [21] también presentan un interesante trabajo en el que los estudiantes aprenden teoría de la luz desde un punto de vista constructivista en un entorno de aprendizaje colaborativo, mediante la interacción de objetos manipulables sobre una mesa interactiva digital. El sistema les permite la construcción de sus propios experimentos manipulando estos

objetos físicos sobre la mesa interactiva. Otro conjunto de trabajos [23, 35, 36] justifican la utilización de tangibles como herramienta para potenciar la interacción, haciéndola más natural y cercana a las experiencias reales.

En los siguientes apartados se presenta el desarrollo, aplicación y evaluación de una nueva herramienta educativa, inspirada en el concepto de computación ubicua e interfaces naturales, capaz de convertir cualquier superficie tradicional de trabajo, en una superficie interactiva digital con capacidades multitáctil y multiusuario, y adicionalmente capaz de ofrecer interacción mediante la manipulación de elementos físicos tangibles.

#### 4.1. Descripción del sistema

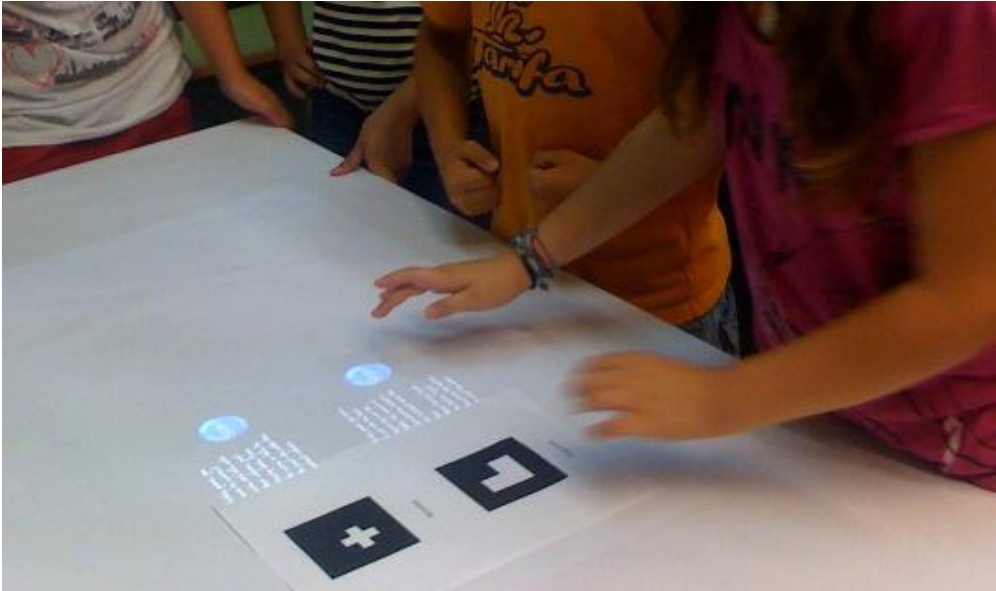
Según la filosofía de la computación ubicua, la tecnología está presente en el entorno, pero pasa desapercibida al usuario. En el caso del sistema desarrollado, se ha pretendido utilizar un soporte para el interfaz tan habitual en las aulas como son los propios pupitres y mesas de trabajo. La tecnología desarrollada permite aumentar las capacidades tradicionales de un pupitre, transformándolo, cuando es necesario, en una superficie digital interactiva multitáctil y multiusuario, mediante un sistema proyectivo interactivo. De este modo la misma superficie de trabajo tradicional utilizada habitualmente por los alumnos se convierte en un espacio de trabajo digital (), combinando las ventajas de ambos escenarios.



*Figura 19:* Alumnos trabajando en el "modo tradicional" sobre una mesa (izquierda).  
Alumnos trabajando en el "modo digital" sobre la misma superficie (derecha).

Cuando el modo digital no está activo, la superficie de trabajo corresponde a una mesa de trabajo totalmente tradicional, pasiva, sin ningún tipo de tecnología añadida. De hecho es posible utilizar cualquier tipo de mesa, con unas mínimas características de color de la superficie (preferiblemente blanco, aunque es un parámetro ajustable) y restricciones de tamaño (con unas dimensiones máximas y mínimas definidas, pero totalmente habituales

en entornos educativos). Esta mesa puede ser utilizada en la forma tradicional sin ningún tipo de restricciones.



*Figura 20: Información digital interactiva, aumentada y contextualizada junto a una página de libro que contiene imágenes fiduciales que el sistema tiene registradas y es capaz de reconocer.*

Cuando se activa el modo digital, el software del interfaz muestra contenido virtual sobre la superficie de la mesa y permite interactuar con él, utilizando las propias manos y dedos, mediante gestos.

Aún cuando los alumnos trabajan en la forma tradicional, la tecnología está activa y presente, sólo que en estado latente y sin realizar ningún tipo de proyección sobre la mesa. La conmutación al espacio digital se realiza de forma automática y transparente al usuario. Para ello el sistema testea continuamente la superficie de la mesa a la espera de algún evento que dispare el cambio de modo. Estos eventos son disparados mediante la detección automática de imágenes que el sistema tiene previamente registradas y que son detectadas por sus cámaras sobre la superficie de la mesa (Figura 20).

A modo de ejemplo, el sistema es capaz de detectar cuando el alumno ha abierto un libro por determinada página, situando contenido aumentado virtual junto a ella (o sobre ella). Para ello el sistema no sólo es capaz de identificar la página, sino también obtener su posición y orientación exacta sobre la mesa. Una vez que la imagen desaparece de la superficie de la mesa (porque se pasa de página, se retira el libro, etc.), el contenido digital

desaparece y la mesa se vuelve a convertir en un espacio de trabajo totalmente tradicional. A este respecto, el sistema es capaz de reconocer marcas fiduciales o cualquier otro tipo de imagen previamente registrada. La ventaja de utilizar marcas fiduciales reside en que se pueden disponer varias simultáneamente sobre la mesa, pues los cálculos requeridos para su reconocimiento son rápidos y su detección es muy robusta.

El sistema permite sin embargo la utilización de cualquier imagen genérica previamente registrada, aunque en este caso los requerimientos de cómputo son más elevados, requiriendo de equipos más potentes.

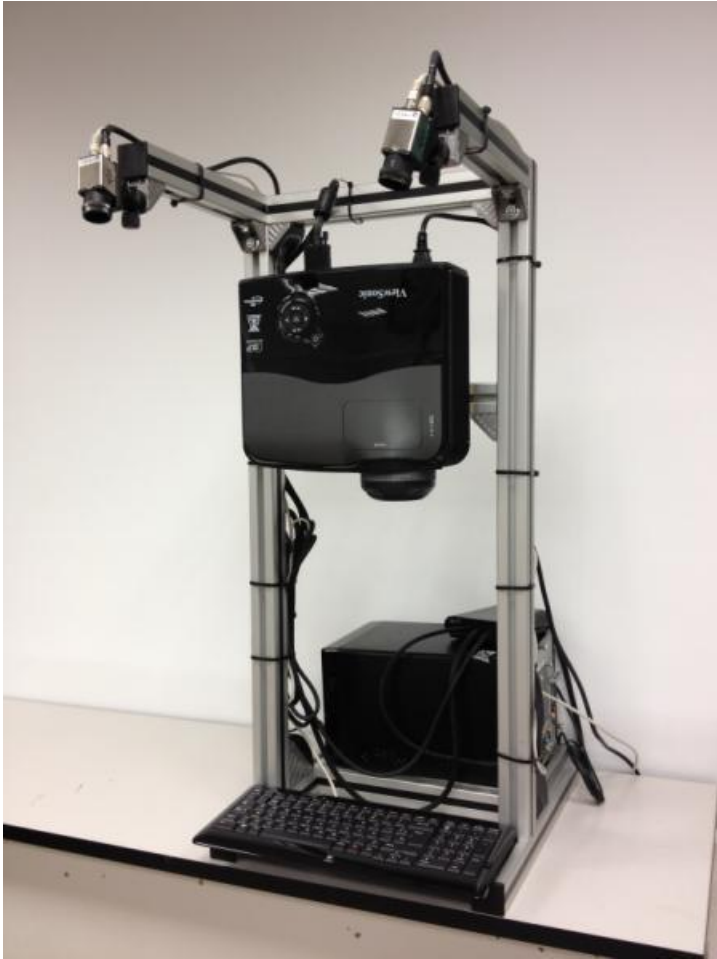
De esta forma, el sistema permite aprovechar los modos de trabajo más tradicionales junto con las ventajas que aporta la tecnología, en un espacio común que facilita una comunicación entre los alumnos en la forma "cara a cara" y que resulta adecuado para las teorías educativas constructivistas que requieren de trabajo en equipo. Al mismo tiempo la tecnología no interfiere con los estudiantes, pues aunque presente en todo momento, únicamente aparece de forma automática y contextualizada cuando ciertos contenidos la requieren y éstos son dispuestos sobre la mesa.

#### ***4.1.1. Detalles de la implementación. Arquitectura Hardware y Software***

El dispositivo utilizado (Figura 21), desarrollado en LabHuman, consiste principalmente en un proyector de video y dos cámaras que capturan imágenes en estéreo del tablero. Su descripción está completamente explicada en profundidad en [13].

El sistema es capaz de reconocer las manos y los dedos de los usuarios, y detectar gestos sobre la superficie (pulsaciones, dobles pulsaciones, arrastres, etc...). Para ello se basa en el análisis de los pares de imagen estereoscópicas captadas por las cámaras. Mediante técnicas de segmentación se pueden reconocer las manos y los dedos de los usuarios. Una vez identificados los extremos de los dedos, se obtiene su posición en el espacio, respecto al sistema de coordenadas del dispositivo, mediante técnicas de triangulación (gracias a las dos imágenes simultáneas). Con esta información el sistema permite detectar si un usuario está tocando el tablero y adicionalmente también es capaz de detectar la distancia a la que se encuentra del mismo, ofreciendo un gran abanico de posibilidades, como manipulación de objetos en 3D, etc...

Utilizando las ópticas adecuadas para las cámaras y el video proyector, la distancia a la que se puede encontrar el dispositivo del tablero puede ser bastante grande. Esto permite su instalación directa en el techo de las aulas, dando lugar a interesantes espacios educativos y orquestaciones de aula, sin crear interferencia en el desarrollo de clases más tradicionales y colaborando en la idea de ubicuidad.

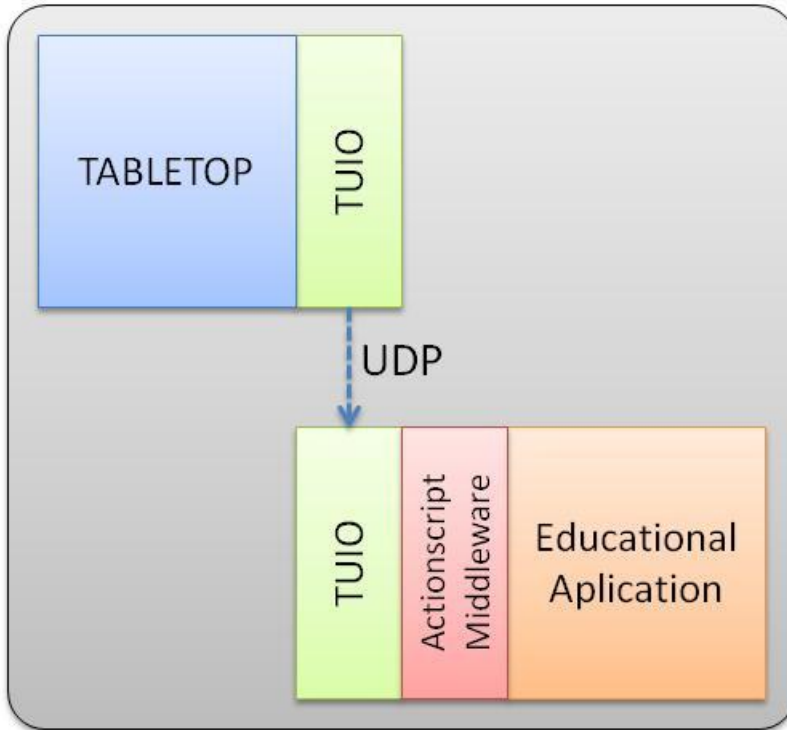


*Figura 21: Detalle del hardware del prototipo desarrollado por LabHuman.*

Al mismo tiempo, el sistema permite el reconocimiento y utilización de marcas fiduciales, al estilo de las utilizadas en Realidad Aumentada, utilizando el motor desarrollado en [57]. Con esta funcionalidad, el dispositivo es capaz de combinar las ventajas de una superficie digital interactiva con las de los sistemas proyectivos de Realidad Aumentada. Esta característica ha sido utilizada en este trabajo desde dos puntos de vista, que se describen en el siguiente apartado.

Paralelamente, el sistema también soporta el reconocimiento de cualquier otro tipo de imagen plana que haya sido previamente digitalizada e incorporada a la base de datos, siguiendo una técnica conocida como "markerless", mediante la utilización de un motor de reconocimiento y seguimiento de texturas planas basado en los trabajos de Wagner et al.

[101] y Kim et al. [48]. En ambos casos el sistema es capaz de identificar las marcas o imágenes y obtener su pose en el espacio 3D.



*Figura 22: Detalle de la capa intermedia de software (middleware) en la estructura de una aplicación típica que hace uso del protocolo TUIO, en este caso desarrollada en ActionScript para Adobe Flash.*

Por otra parte, con el objetivo de simplificar al máximo las tareas de desarrollo de software en capas superiores (capa de aplicación) y de dotar al sistema de la mayor compatibilidad, se desarrolló un API de comunicaciones basado en el protocolo TUIO [43]. Este protocolo ofrece un amplio abanico de librerías de desarrollo para la mayoría de lenguajes de programación de alto nivel (C, C++, JAVA, PYTHON, etc...), así como interfaces para las principales plataformas de desarrollo (Unity3D, Ogre3D, Adobe Flash, etc...).

TUIO está implementado sobre los protocolos UDP y TCP, aunque habitualmente se emplea UDP para aumentar el rendimiento en las tasas de transferencia y reducir latencias. A este respecto, el propio protocolo TUIO implementa cierto nivel de redundancia de datos que permite utilizar UDP con seguridad en las transmisiones, evitando la necesidad



de recurrir a comunicaciones TCP (que garantizan la integridad de los datos) en la mayoría de los casos.

Este tipo de comunicaciones permite la implementación de una arquitectura distribuida en el desarrollo de aplicaciones sobre el dispositivo, lo cual dota de gran flexibilidad al sistema, independizando el computador asociado al dispositivo con el asociado a la aplicación cliente, incluso permitiendo la conexión en paralelo de varias aplicaciones cliente sobre el mismo dispositivo que actúa como servidor.

Uno de los principales problemas a los que se deben enfrentar los grupos de desarrollo en la generación de contenido para los sistemas basados en nuevas tecnologías y multimedia, es la dificultad y las restricciones que surgen en la fase de generación de contenidos. Para sortear estas limitaciones es conveniente la utilización de sistemas de producción multimedia y plataformas de desarrollo basadas en motores gráficos tales como Unity3D, Ogre3D o Adobe Flash, entre otros.

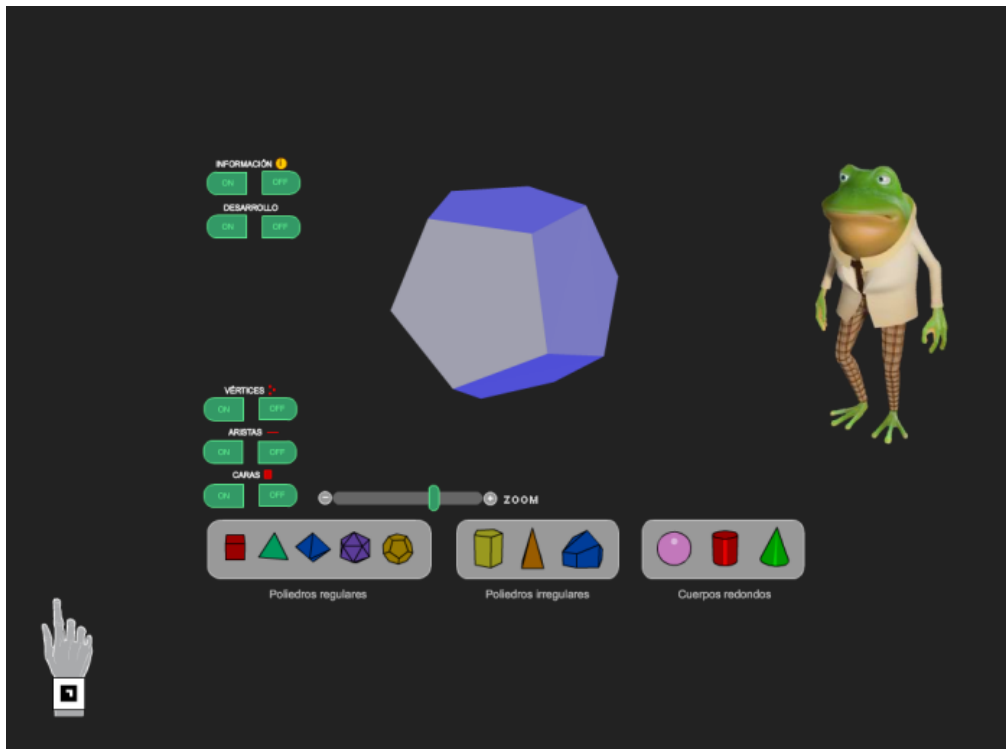
Este tipo de plataformas permite independizar de una forma bastante efectiva las distintas tareas en equipos de desarrollo heterogéneos, formados por profesionales de distintos campos (programadores, modeladores 3D, diseñadores gráficos, especialistas en sonido, músicos, ...) y que resultan muy habituales en este tipo de producciones. Al mismo tiempo ofrecen las herramientas necesarias a los programadores para integrar de una manera sencilla todo este tipo de información digital en la aplicación final. Otra gran ventaja de este tipo de plataformas es que una vez desarrollada la aplicación, permiten generar la solución final para distintos tipos de máquinas y sistemas operativos (Windows, OS X, IOS, Android, ...).

Para facilitar aún más el desarrollo de aplicaciones para este sistema, en particular aplicaciones de carácter educativo, se han desarrollado unas capas intermedias de software ("middleware"), que se sitúan entre la capa de comunicaciones del protocolo TUIO y la propia aplicación (Figura 22). De este modo el grupo de desarrolladores puede centrarse únicamente en el desarrollo de la aplicación educativa, interaccionando con el sistema mediante la interfaz ofrecida por el middleware que oculta la complejidad de las comunicaciones y del protocolo TUIO.

En este trabajo se han desarrollado capas "middleware" para las plataformas Adobe Flash (en ActionScript) y Unity3D (en C#). Estas capas reciben las tramas TUIO enviadas por el sistema, identifican los gestos que se dan sobre la superficie interactiva y los traducen a clics del ratón, arrastres, operaciones de zoom, rotaciones, etc., mediante la generación de eventos en la aplicación. Del mismo modo, gestionan los diferentes marcadores de Realidad Aumentada dispuestos sobre el tablero, ofreciendo información al programador sobre su número, identificadores, y poses en el espacio 3D referenciado al sistema de coordenadas del propio tablero.

## 4.2. Desarrollo de contenidos educativos

Para el estudio, se desarrollaron una serie de aplicaciones educativas sobre "formas geométricas" con contenidos de nivel para 5º curso de Educación Primaria (niños de 10 años de edad). En este caso las aplicaciones fueron desarrolladas en Adobe Flash y el "middleware" en ActionScript.



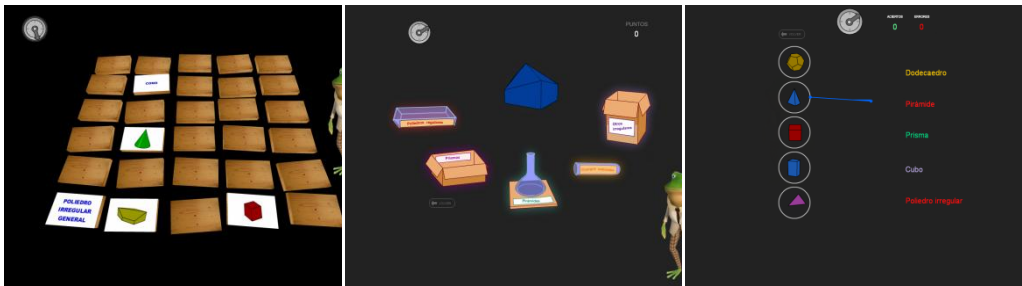
*Figura 23: Interfaz del Examinador de Cuerpos Geométricos.*

Por un lado, se desarrolló una aplicación diseñada principalmente para ser utilizada por los profesores, denominada "Explorador de Cuerpos Geométricos" (Figura 23). Esta aplicación la puede utilizar el profesor para realizar la explicación de las lecciones sobre las propias mesas de los alumnos mediante la información "aumentada" que ofrece el sistema. Se trata de una aplicación interactiva en 3D que permite manipular y visualizar las diferentes formas geométricas elementales. La aplicación permite explorar todas las características de los principales cuerpos geométricos, de acuerdo con las necesidades del nivel educativo.

Una de las premisas en el diseño de la aplicación era que debía ser muy fácil de usar y resultar intuitiva, ya que en entrevistas previas con profesores, todos ellos mostraron la preocupación por la complejidad que pudieran presentar. A este respecto, se decidió

desarrollar un personaje a modo de asistente virtual que aparece en todas las aplicaciones. Este asistente virtual se encarga de explicar a los estudiantes la funcionalidad básica de cada aplicación y proporciona información sobre curiosidades del temario, puntuaciones en los juegos, tiempos, etc.

Por otro lado, se desarrollaron un conjunto de juegos (Figura 24 y Figura 25) destinados para que los alumnos pusieran en práctica los conceptos aprendidos de una manera divertida, lo que garantiza un nivel de atención superior y más prolongado en el tiempo. Se desarrollaron cuatro juegos educativos: un juego de relación, un juego de clasificación, un juego "memory" de emparejamiento y un juego de acción.



*Figura 24: Memory (izquierda), clasificación (centro) y relación (derecha).*



*Figura 25: Vista general del juego de acción (izquierda). Un alumno jugando y portando una marca de identificación (centro). Detalle de la implementación de elementos tangibles mediante marcas fiduciales (derecha).*

### **4.3. Capacidades añadidas a partir de la capacidad del sistema en reconocimiento de marcas fiduciales**

La capacidad del sistema de reconocimiento de marcas fiduciales ha sido aprovechada en el desarrollo de esta herramienta educativa de varias formas diferentes, que han

permitido aumentar las capacidades que comúnmente ofrecen las superficies digitales interactivas.

#### ***4.3.1. Utilización de marcas fiduciales para implementar interacción mediante la utilización de elementos tangibles***

A partir de la posibilidad de reconocimiento de marcas fiduciales, se ha dotado al sistema de la capacidad de interacción mediante la utilización de elementos tangibles.

La idea de incorporar esta forma adicional de interacción viene motivada porque tal y como se ha comentado en apartados anteriores, diversos trabajos de investigación [23, 35, 36, 42, 64] destacan las ventajas que ofrece la utilización de elementos físicos reales para la interacción con el sistema, dado que presentan metáforas de uso a operaciones de manipulación reales a las que están acostumbradas los usuarios, y de este modo contribuyen a romper la barrera que puede ofrecer la tecnología y ofrecer interfaces más naturales.



*Figura 26: Detalle del modo en el que colaboran los alumnos mientras aprenden con el juego de acción. Detalle de la interacción mediante el elemento tangible.*

De igual modo, otros trabajos [21] demuestran que la incorporación de elementos tangibles mejora la interacción de los usuarios con el sistema y particularmente aumentan el grado de colaboración en la solución problemas. Este principio, aplicado a la educación, ayuda a mejorar el trabajo en equipo y el aprendizaje colaborativo.

La herramienta desarrollada permite la utilización de cualquier objeto físico real como elemento tangible de interacción. Para ello simplemente es necesario asociarle una marca fiducial similar a las empleadas en aplicaciones de Realidad Aumentada.

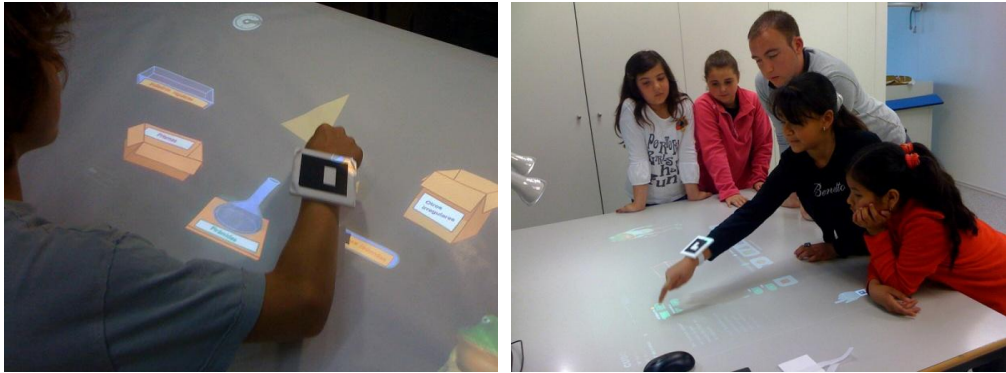
El sistema reconoce automáticamente la marca cuando el objeto se dispone sobre el tablero, devolviendo al desarrollador su identificación y pose en el espacio 3D, lo cual le permite identificar al objeto y obtener su posición y orientación. Es importante destacar que las capacidades de reconocimiento 3D del sistema (gracias a la utilización de las dos cámaras en estéreo y a su software) permiten identificar y retornar la pose de marcas asociadas a objetos tridimensionales, de diferentes tamaños y alturas, aumentando las posibilidades y flexibilidad en la utilización de elementos físicos que supongan metáforas de objetos reales.

En el caso de la herramienta educativa desarrollada para realizar la evaluación del sistema, se optó por la utilización de objetos físicos realizados con cartón pluma, dado su bajo costo económico y facilidad de reproducción, características especialmente interesantes para su utilización en centros educativos. Su utilización se centro en el juego de acción (Figura 25), en el que hay que manejar un símil de cañón para apuntar y disparar sobre los objetos geométricos que el asistente virtual va indicando a los alumnos. El cañón se representa mediante un objeto tangible en cartón pluma con la silueta del objeto y una marca fiducial impresa sobre el mismo. Los estudiantes simplemente deben apuntar con él a los distintos objetos (Figura 26). La simple presentación del cañón sobre la propia mesa de trabajo de los alumnos hace que el sistema proyectivo se active y lance el juego. De igual forma, la retirada del objeto de la mesa (con los preceptivos filtros para obviar oclusiones esporádicas) hace que la mesa se vuelva a convertir en un espacio de trabajo tradicional.

#### ***4.3.2. Utilización de marcas fiduciales para identificar y registrar las acciones de los alumnos***

En los entornos de aprendizaje colaborativo es necesario evaluar el grado de participación de cada alumno y sus contribuciones al grupo [76]. Desde un punto de vista clásico, por lo general es el propio profesor quien se encarga de esta tarea, observando el desarrollo del trabajo de los estudiantes tanto a nivel individual como colectivo. Sin embargo esta labor se convierte en compleja cuando el número de grupos de trabajo a

gestionar y evaluar es elevado, dificultando la capacidad del profesor en la evaluación individualizada de cada alumno.



*Figura 27: Estudiante portando un brazalete con una marca fiducial identificadora (izquierda). Grupo de niños realizando un test previo de usabilidad sobre la mesa digital interactiva, bajo la supervisión de un profesional experto en la materia.*

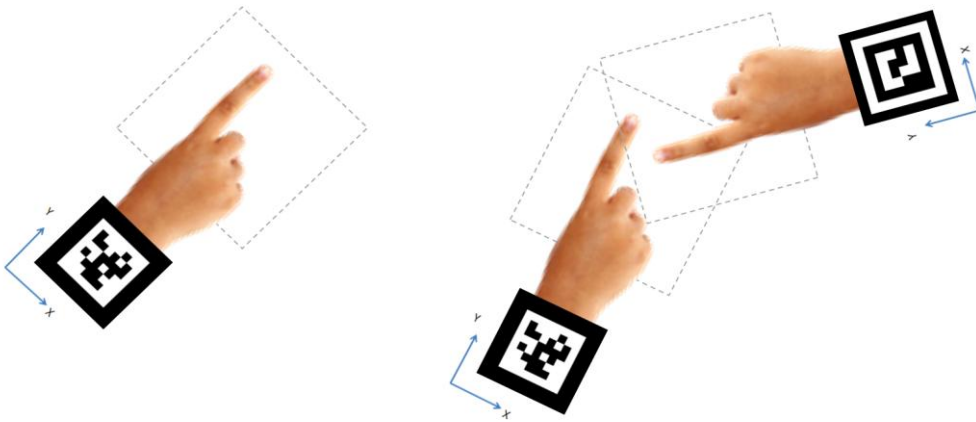
Este tipo de situaciones ha sido tradicionalmente gestionado mediante la utilización de sistemas audiovisuales con los que se graban las sesiones de trabajo de los distintos grupos. Los videos generados son posteriormente visionados y analizados por los profesores, extrayendo conclusiones tanto a nivel grupal como individual. A este respecto, algunos trabajos [54] ofrecen formas de representación de la interacción de los alumnos con el sistema, generando una especie de mapas de participación. Sin embargo, este proceso es lento y no muy adecuado para su uso en entornos reales en el que los profesores no disponen de demasiado tiempo para dedicar a esta tarea. Debido a esta circunstancia, en muchas ocasiones este tipo de evaluaciones exhaustivas únicamente se emplean de forma ocasional y para casos específicos, o bien se debe recurrir a extensas plantillas de profesorado que permitan abordar la labor.

En este sentido, la recopilación automática de información acerca la participación de cada estudiante sobre la superficie interactiva puede resultar de ayuda al profesor a la hora de realizar tanto la evaluación del grupo como la de cada alumno por separado.

El sistema desarrollado permite la identificación de los alumnos mediante la utilización de unos brazaletes que portan una marca fiducial que los identifica (Figura 27). De esta manera el sistema es capaz de asociar cada acción realizada sobre la superficie interactiva con el alumno que la realiza, registrando cada evento en una base de datos que permite generar finalmente unas métricas (compatibles con las hojas de cálculo más habituales) que pueden ser analizadas y servir de ayuda en la evaluación de cada estudiante y del propio grupo.

El sistema almacena automáticamente en orden cronológico: las entradas y salidas de cada estudiante sobre el espacio de trabajo, las pulsaciones sobre la superficie interactiva, acciones gestuales, eventos generados, el éxito y los fracasos causados por sus acciones, etc. Esta información puede ser posteriormente analizada y sintetizada, tal vez de forma automática, produciendo resultados que resultan de utilidad en la evaluación del grado de participación de cada alumno y de la propia actividad del grupo, entre otros parámetros.

El mecanismo de funcionamiento radica en la capacidad del sistema en reconocer marcas fiduciales, retornando, además de su identificador, su posición y orientación en el sistema de coordenadas asociado al plano de la superficie interactiva.



*Figura 28: Área de acción asociada a una marca fiducial de identificación (izquierda). Ejemplo de conflicto (derecha).*

Esta información permite delimitar un área, asociada a la zona en la que se mueve la mano, en la que con una alta probabilidad tendrán lugar las acciones realizadas por el usuario que porta esa marca (Figura 28). En los casos en los que existe solapamiento, por ejemplo porque varios usuarios hacen clic a la vez sobre un mismo objeto, el sistema asocia y registra la acción para ambos usuarios al mismo tiempo.

Para la realización de la experiencia de evaluación del sistema como herramienta educativa, éste fue adaptado para ser utilizado por niños de 10 años, optimizando los algoritmos de reconocimiento al tamaño de sus manos y dedos.

Para ello, se diseñó un primer experimento en el que 20 niños probaron la mesa interactiva bajo la supervisión de un profesional experto en usabilidad, que utilizó una de las aplicaciones desarrolladas para este estudio (Figura 27, derecha).

## 4.4. Evaluación del Sistema

La evaluación del sistema se desarrolló en un contexto educativo real. El sistema fue utilizado por un grupo de estudiantes de 5° curso de Educación Primaria y concretamente, la experiencia se realizó sobre siete unidades temáticas de la asignatura de Matemáticas. Todas las unidades temáticas se desarrollaron siguiendo un método tradicional, a excepción de la unidad temática número 4, correspondiente al estudio de "Los Cuerpos Geométricos", en la que se utilizó el nuevo sistema. Para la experiencia se utilizaron dos dispositivos dispuestos de manera simultánea en la misma clase.

Particularmente, la unidad temática número 4 se desarrolló a lo largo de seis sesiones. En las cuatro primeras, los profesores utilizaron el dispositivo al principio de las clases, empleándolo para explicar de forma interactiva los principales conceptos acerca de los cuerpos geométricos. La metodología seguida se detalla en la Tabla 6.

Sesión	Contenido	Recursos	Metodología
1	<i>Introducción a los cuerpos geométricos</i>	- Examinador de Cuerpos Geométricos	El profesor hace uso del sistema para explicar los conceptos a grupos de 10 niños dispuestos alrededor de la mesa interactiva, realizando eventualmente preguntas que deben responder utilizando también el sistema.
2	<i>Poliedros Regulares</i>	- Examinador de Cuerpos Geométricos - Memory (nivel 1)	El profesor explica los conceptos relativos a los poliedros regulares mediante la superficie interactiva, y los alumnos practican los conocimientos adquiridos con el "memory".
3	<i>Poliedros Irregulares</i>	- Examinador de Cuerpos Geométricos - Memory (niveles 2 y 3)	El profesor explica los conceptos relativos a los poliedros irregulares mediante la superficie interactiva, repasando también los conceptos anteriores, y los alumnos practican los conocimientos adquiridos con el "memory".
4	<i>Cuerpos Redondos</i>	- Examinador de Cuerpos Geométricos - Memory (nivel 4) - Actividad de clasificación	El profesor explica los conceptos relativos a cuerpos redondos mediante la superficie interactiva, repasando también los conceptos anteriores, y los alumnos practican los conocimientos adquiridos con el "memory" y la aplicación de clasificación.
5 y 6	<i>Ejercicios de refuerzo</i>	- Memory - Actividad de relacionar - Actividad de clasificación - Juego de acción	El profesor organiza grupos de alumnos tratando de promover la competitividad y decide el orden de los juegos/actividades. Los alumnos, por sí mismos, tratan de resolver de forma colaborativa sus dudas, ayudándose los unos a los otros, bajo la supervisión del profesor.

Tabla 6: Planificación del desarrollo de la Unidad 4: Los Cuerpos Geométricos.

En las explicaciones se hizo uso de la aplicación "Explorador de Cuerpos Geométricos" reuniendo a grupos de aproximadamente 10 alumnos alrededor de la mesa de trabajo convertida en superficie digital interactiva (Figura 29). De forma paralela a las explicaciones, los profesores implicaban a los alumnos mediante la formulación de preguntas y solicitud de demostraciones que debían responder y realizar utilizando la propia aplicación. La segunda parte de las clases se dedicó a que los alumnos practicasen



en grupo los conocimientos adquiridos mediante la utilización de los juegos educativos desarrollados, adaptados al nivel adquirido.



*Figura 29: Detalle de utilización de la herramienta "Explorador de Cuerpos Geométricos" por parte de profesora y alumnos.*

En esta fase los profesores se dedicaron a participar únicamente como supervisores en la realización de las actividades, siendo los propios grupos de alumnos quienes se encargaban de corregir sus errores, generar la ayuda entre compañeros y en definitiva gestionar su propio conocimiento.

En las últimas dos sesiones los profesores plantearon el desarrollo de las clases tratando de promover la competitividad. Para ello, organizaron distintos grupos de alumnos que debían competir entre ellos mediante la utilización de los juegos educativos y del propio "Explorador de Cuerpos Geométricos" que utilizaban para formular baterías de preguntas entre unos grupos y otros. Igual que en las sesiones anteriores, fueron los propios alumnos quienes se encargaron de gestionar su propio conocimiento.

Para analizar el impacto de la herramienta sobre el proceso de aprendizaje, se seleccionaron tres parámetros a ser estudiados: eficiencia (rendimiento académico), usabilidad y motivación.

### 4.4.1.- Eficiencia

La eficiencia se evaluó desde el punto de vista de la asimilación de nuevo conocimiento.

Pese a que en un caso ideal hubiera resultado deseable contar con un grupo de control en el diseño del experimento, en la práctica resultó imposible debido principalmente a que dado que el estudio se realizó en un contexto educativo real, se generaban agravios comparativos entre los estudiantes que hacían uso del sistema y los que no, resultando preferible para los profesores que todos los alumnos realizaran la experiencia.

De acuerdo con esto, inicialmente se realizó un experimento basado en un esquema de diseño cuasi experimental de series interrumpidas en el tiempo [12], en el que participaron un total de veintiocho estudiantes (catorce chicos y catorce chicas) pertenecientes a una clase de 5° curso de Educación Primaria.

El estudio se centró en el análisis de los resultados de siete unidades temáticas pertenecientes a la asignatura de Matemáticas, de complejidad similar según el criterio de los profesores. Seis de ellas se impartieron siguiendo el método tradicional empleado en el centro (las calificaciones medias de los alumnos se utilizaron para las observaciones O1, O2, O3, O5, O6 y O7 respectivamente), mientras que la unidad temática número 4 (observación O4), correspondiente al estudio de los cuerpos geométricos, se impartió utilizando el nuevo sistema desarrollado siguiendo la metodología antes descrita. Las calificaciones se expresan en una escala de 0 a 10 puntos. El esquema del experimento se muestra en la Tabla 7.

<i>Observaciones (O) y utilización del nuevo sistema (X)</i>							
<i>O<sub>1</sub></i>	<i>O<sub>2</sub></i>	<i>O<sub>3</sub></i>	<i>X</i>	<i>O<sub>4</sub></i>	<i>O<sub>5</sub></i>	<i>O<sub>6</sub></i>	<i>O<sub>7</sub></i>

*Tabla 7: Esquema del diseño cuasi experimental basado en series interrumpidas en el tiempo.*

La Tabla 8 recoge los resultados de la aplicación del test de Kolmogórov-Smirnov (prueba K-S) para una muestra, sobre las calificaciones obtenidas por cada estudiante en cada una de las respectivas unidades temáticas (T1 - T7). Para un nivel de significación  $\alpha = 0.05$ , la hipótesis alternativa indica que las muestras no siguen una distribución normal, mientras que la hipótesis nula indica que sí que la siguen.

<b>p-valor</b>	
T1	0.935
T2	0.674
T3	0.790
T4	0.583
T5	0.972
T6	0.570
T7	0.153

Tabla 8: Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov (K-S) para una muestra sobre las calificaciones de los alumnos para cada una de las unidades temáticas.

De los resultados se desprende que en todos los casos el *p-valor* es mayor al valor de significancia  $\alpha = 0.05$ , y por lo tanto en todos los casos se acepta la hipótesis nula, demostrando que en todas las unidades temáticas las calificaciones de los alumnos siguen una distribución normal. lo cual posibilita la aplicación de los posteriores análisis paramétricos.

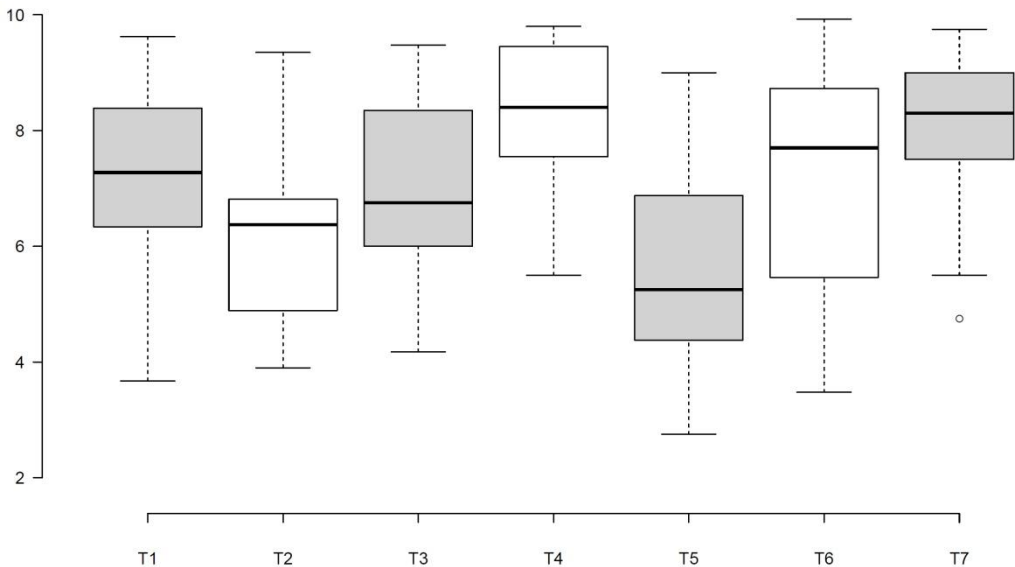


Figura 30: Diagrama de caja de los resultados obtenidos por los alumnos en la evaluación de la unidad temática 4.

A la vista del diagrama de caja presentado en la Figura 30 se observa que los resultados de las calificaciones obtenidas por los alumnos en la evaluación de la unidad temática

número 4 parecen ser significativamente superiores a los obtenidos en las otras unidades temáticas (a excepción de la séptima).

Para validar este supuesto se plantea un análisis mediante un conjunto de pruebas de *t* de Student dependientes para muestras pareadas. Concretamente se realizaron 6 *t-test* con un intervalo de confianza del 95% ( $\alpha = 0.05$ ), comparando las calificaciones obtenidas por los alumnos respectivamente en las unidades temáticas T1, T2, T3, T5, T6 y T7, frente a las calificaciones obtenidas por los alumnos en la unidad temática T4.

Se toma como hipótesis alternativa el que los alumnos obtienen mejores calificaciones en la unidad temática número 4 frente al resto de unidades temáticas, mientras que se toma como hipótesis nula el que las diferencias obtenidas entre las distintas calificaciones son debidas únicamente al azar. Los resultados de este análisis se recogen en la Tabla 9. La columna "Media" muestra las calificaciones medias y la desviación estándar para las unidades temáticas T1, T2, T3, T5, T6 y T7, mientras que por su parte la columna "Media T4" muestra las calificaciones medias y la desviación estándar para la unidad temática T4.

	Media (desviación estándar)	Media T4 (desviación estándar)	t Student	Valor crítico para t (prueba de dos colas)
T1	7.16 (1.48)		4.07	2.05
T2	5.98 (1.42)		11.54	2.05
T3	7.13 (1.51)	8.23 (1.25)	4.18	2.05
T5	5.67 (1.75)		7.68	2.05
T6	6.90 (2.41)		3.39	2.05
T7	7.84 (1.97)		1.35	2.05

*Tabla 9: Resultados de la prueba t de Student comparando los resultados de las siete unidades temáticas.*

A la vista de los resultados, todos los valores del estadístico *t*, excepto para la unidad temática 7, se encuentran fuera del intervalo de confianza  $\pm 2.05$ , debiéndose aceptar en todos estos casos la hipótesis alternativa mientras que en el caso de la unidad temática 7 se debe aceptar la hipótesis nula. Dicho de otro modo, las calificaciones obtenidas por los alumnos en la unidad temática número 4 son significativamente superiores a los obtenidos en las unidades 1, 2, 3, 5, y 6, mientras que las diferencias observadas entre las unidades 4 y 7 no resultan significativas.

Adicionalmente, para reforzar los resultados y dado que no se pudo contar con un grupo de control en el mismo curso académico, se realizó un segundo análisis basado nuevamente en un esquema de diseño cuasi experimental de series interrumpidas en el

tiempo, pero utilizando esta vez como grupo de control el grupo de alumnos que cursó la asignatura en el año académico anterior.

	Observaciones (O) y utilización del nuevo sistema (X)							
Cohorte 1 Año n-1	O <sub>11</sub>	O <sub>12</sub>	O <sub>13</sub>		O <sub>14</sub>	O <sub>15</sub>	O <sub>16</sub>	O <sub>17</sub>
Cohorte 2 Año n	O <sub>21</sub>	O <sub>22</sub>	O <sub>23</sub>	X	O <sub>24</sub>	O <sub>25</sub>	O <sub>26</sub>	O <sub>27</sub>

*Tabla 10: Esquema del diseño cuasi experimental basado en series interrumpidas en el tiempo, utilizando como grupo de control el grupo de alumnos que cursó la asignatura el año académico anterior.*

Para ello se utilizó el esquema de diseño cuasi experimental que se muestra en la Tabla 10. La "cohorte 1" recoge las observaciones de las calificaciones de los alumnos pertenecientes al grupo que se utiliza como grupo de control, el cual curso la asignatura el año académico inmediatamente anterior (año n-1) al del curso actual. Por su parte, la "cohorte 2", recoge las observaciones de las calificaciones obtenidas por el grupo de alumnos que cursa la asignatura en el año académico ordinario (año n), y sobre el cual se utiliza el nuevo sistema en la unidad temática número 4.

Nuevamente, para asegurar la normalidad de los datos, se aplica el test de Kolmogórov-Smirnov (prueba K-S) para una muestra sobre las calificaciones obtenidas por los estudiantes en el año académico 'n-1', para cada una de las respectivas unidades temáticas (T1 - T7). La Tabla 11 recoge los resultados del test para ambos grupos, de los que se desprende que en todos los casos las calificaciones de los alumnos siguen una distribución normal para un nivel de significación  $\alpha=0.05$ .

<b>Año n-1</b>	<b>p-valor</b>	<b>Año n</b>	<b>p-valor</b>
T1	0.928	T1	0.935
T2	0.981	T2	0.674
T3	0.819	T3	0.790
T4	0.941	T4	0.583
T5	0.902	T5	0.972
T6	0.972	T6	0.570
T7	0.943	T7	0.153

*Tabla 11: Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov (K-S) para una muestra sobre las calificaciones de las unidades académicas T1 a T7 tanto para el grupo de control (izquierda) como para el grupo objeto del estudio (derecha).*

El diagrama de cajas que se muestra en la Figura 31 recoge las calificaciones obtenidas por los alumnos en cada unidad temática, tanto del grupo utilizado como grupo de control (T1c - T7c, representadas en gris), como del grupo bajo estudio (T1 - T7, representadas en blanco).

A la vista del gráfico, es notable el incremento en las calificaciones de los alumnos que cursan la unidad temática 4 con el nuevo sistema, frente al grupo de alumnos que la estudiaron siguiendo el método tradicional en el curso académico anterior.

También se puede extraer del gráfico cierto grado de equivalencia en las calificaciones entre ambos grupos para las unidades temáticas T1, T2, T3 y T5. sin embargo sí que se observa un incremento en las mismas en las unidades temáticas T6 y T7, aunque es más evidente en la T4.

En cualquier caso, para validar estas hipótesis, la Tabla 12 recoge los resultados de la aplicación de respectivas pruebas 't de Student' para cada pareja de unidades temáticas. En este caso se toma como hipótesis nula la no existencia de diferencias significativas entre las calificaciones obtenidas por los alumnos en ambos grupos, mientras que la hipótesis alternativa indica que las calificaciones para cada una de las unidades temáticas de la asignatura fueron mejores en el año académico en el que se realiza el estudio que las obtenidas en el curso académico anterior.

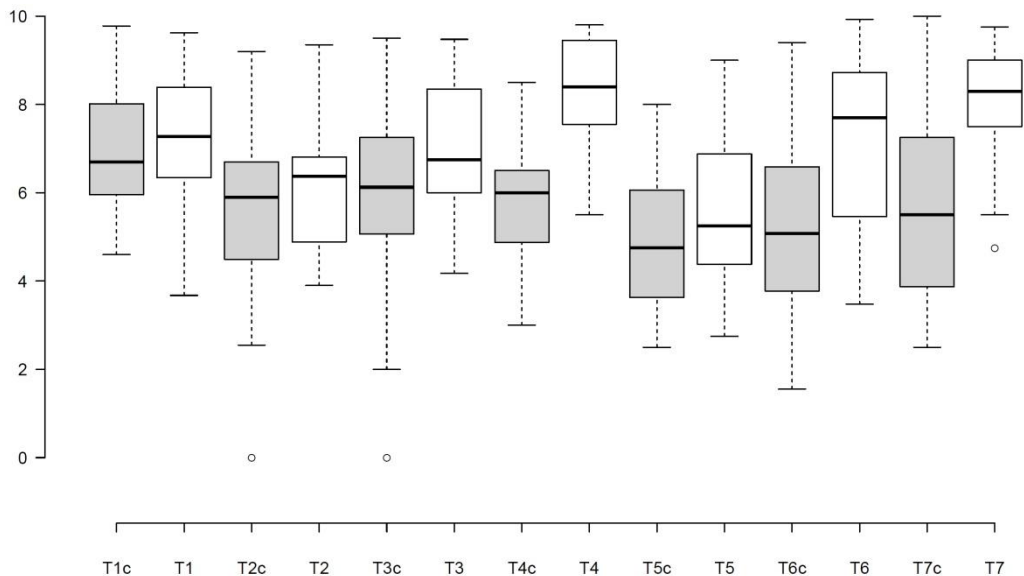


Figura 31: Diagrama de caja de los resultados obtenidos por los alumnos en la evaluación de la unidad temática 4, para ambos grupos. El grupo de control corresponde al que se muestra sombreado.

	Media año 'n-1' (desviación estándar)	Media año 'n' (desviación estándar)	t Student	Valor crítico para t (prueba de dos colas)
T1	6.73 (1.34)	7.16 (1.48)	0.84	2.05
T2	4.04 (1.98)	5.98 (1.42)	1.22	2.05
T3	4.73 (2.20)	7.13 (1.51)	1.74	2.05
T4	5.57 (1.56)	8.23 (1.25)	5.65	2.05
T5	4.69 (1.65)	5.67 (1.75)	1.30	2.05
T6	4.86 (2.10)	6.90 (2.41)	3.46	2.05
T7	5.34 (2.07)	7.84 (1.97)	5.51	2.05

*Tabla 12: Resultados de la prueba t de Student comparando los resultados de las siete unidades temáticas.*

A la vista de los resultado, se acepta la hipótesis alternativa para las unidades temáticas T4, T6 y T7, y por lo tanto se demuestra que los alumnos obtuvieron mejores calificaciones en esas unidades temáticas en el curso académico en el que se realizó el estudio, mientras que en el resto los resultados no ofrece diferencias significativas.

Se puede concluir que el grupo de alumnos que cursó la unidad temática número 4 utilizando el nuevo sistema obtuvo mejores calificaciones (con el mejor valor del estadístico t en todos los casos y presentando por lo tanto la diferencia más notable) que las obtenidas por el grupo que la cursó en el año académico anterior, el cual siguió un método tradicional.

Por su parte, las diferencias encontradas para las unidades temáticas 6 y 7 no quedan explicadas, sin embargo no invalidan las conclusiones. En conversaciones con los profesores se apunta como una de las posibles causas a cambios en la metodología empleada en el desarrollo de las clases de estas unidades temáticas.

A criterio de los profesores, a excepción de los resultados obtenidos en las unidades temáticas T4, T6 y T7, en general se trata de dos grupos bastante parecidos, resultando en promedio un poco mejor el grupo perteneciente al curso académico en el que se realiza la experiencia, tal y como corroboran los análisis.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el primer análisis (Tabla 9), demostrando que los alumnos que cursaron la unidad temática número 4 utilizando el nuevo sistema, obtuvieron de forma significativa mejores calificaciones que las obtenidas en el resto de unidades temáticas (a excepción de la número 7), y al mismo tiempo también obtuvieron significativamente mejores calificaciones a las obtenidas por un grupo de control bastante similar que la curso el año académico anterior.

#### 4.4.2.- Usabilidad/Satisfacción

Para evaluar el grado de usabilidad y la satisfacción de los estudiantes en el manejo del sistema, se utilizó un cuestionario en escala Likert [52] de 5 valores. La Tabla 13 recoge el cuestionario y los resultados obtenidos. El cuestionario fue rellenado por los alumnos al término de la unidad temática número 4, en la que tuvieron que utilizar el sistema desarrollado.

Cuestiones		Media	Desv. Est.
Usabilidad	Q1 Prefiero utilizar el material tradicional antes que el nuevo sistema <sup>1</sup>	4,8	0,38
	Q2 Me ha resultado fácil entender las cuerpos geométricos utilizando esta tecnología	4,8	0,44
	Q3 Creo que este sistema me ayudará a realizar un mejor examen	4,4	0,97
	Q4 Me resultó sencillo aprender a manejar este sistema	4,3	0,82
	Q5 Me gustaría utilizar este tipo de sistemas también en casa	5,0	0,00
Satisfacción	Q6 En estas clases he estado más atento/a que en otras	4,1	0,78
	Q7 Estas clases me han parecido útiles e interesantes	4,4	0,78
	Q8 Me gustaría tener más clases como las de hoy	5,0	0,00
	Q9 Es más fácil seguir las explicaciones del profesor en las clases en las que se ha usado este sistema	4,7	0,70
	Q10 En la clase de hoy me he comportado mejor que en otras clases	3,8	1,06

<sup>1</sup> La valoración de esta cuestión se muestra invertida

Tabla 13: Cuestionario y resultados de los test de usabilidad y satisfacción.

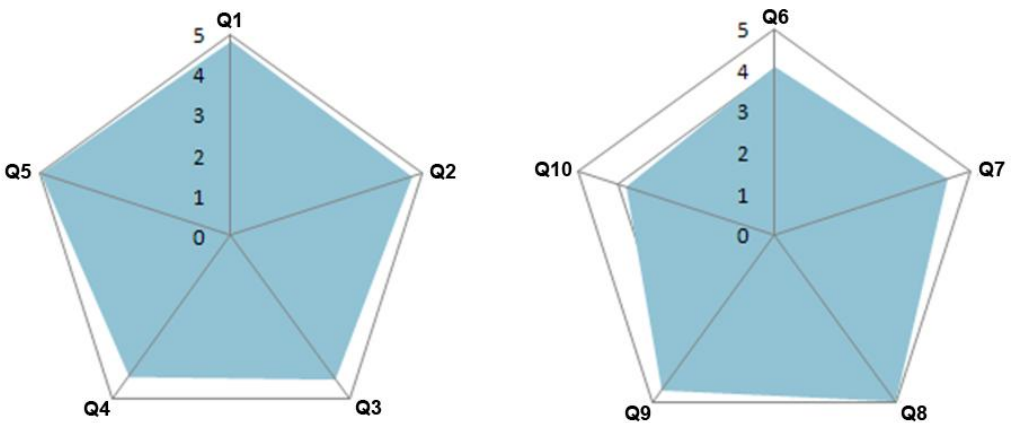
Es importante reseñar que ningún alumno había recibido entrenamiento previo en la herramienta y se trataba de la primera vez que la utilizaban. Los alumnos simplemente intuyeron su manejo al ver cómo la utilizaban los profesores cuando les impartían clase con ella. Aún así, tal y como reflejan los resultados, los estudiantes encontraron su manejo fácil y natural, lo que constituye uno de los principales objetivos de la investigación.

La Figura 32 muestra una representación gráfica de los resultados obtenidos. Desde el punto de vista de la usabilidad, el resultado de la cuestión Q1 (su valor está invertido con el objetivo de su mejor representación en los gráficos) refleja claramente que la gran mayoría de los estudiantes muestran su preferencia por utilizar el nuevo sistema desarrollado frente a la utilización de libros y materiales clásicos. Los resultados de las



cuestiones Q2 y Q4 indican que mayoritariamente los alumnos encontraron el manejo de la herramienta simple y transparente, ayudando a entender los conceptos de la materia sin introducir una complejidad añadida. Por su parte, de la cuestión Q3 se desprende que los alumnos creen que la nueva herramienta les puede ayudar a alcanzar mejores calificaciones en la materia y tal y como refleja la cuestión Q5, a la mayoría les gustaría poder utilizar esta tecnología como material de trabajo en casa.

Desde el punto de vista de la evaluación de la satisfacción, se observa que los alumnos prestaron mayor atención a las clases (Q6), las cuales les resultaron útiles e interesantes (Q7). Estos resultados reflejan que mayoritariamente los alumnos estuvieron más concentrados durante el desarrollo de las lecciones. La cuestión Q8 es un indicativo general de satisfacción, en el que los alumnos manifiestan rotundamente que les gustaría poder utilizar este sistema en otras unidades temáticas y materias. Por su parte, el resultado de la cuestión Q9 resulta especialmente interesante, pues a través de él los alumnos reconocen que gracias a la utilización del sistema desarrollado, les resulta más sencillo seguir las explicaciones del profesor. Por último, y como consecuencia del mayor grado de interés despertado, gran parte de los estudiantes reconocen que han mejorado su comportamiento en las clases en las que se ha utilizado este sistema.



*Figura 32: Representación gráfica de los resultados del test de usabilidad (izquierda) y satisfacción (derecha).*

Desde el punto de vista de los profesores, se recogió información a través de entrevistas personales mantenidas con ellos. Al igual que en el caso de los estudiantes, ningún profesor recibió formación previa en el uso de la nueva herramienta. De las conversaciones con ellos, también destacaron la simplicidad de uso y la transparencia que ofrece el sistema.

### 4.4.3.- Motivación

La evaluación de la motivación se desarrolló mediante la utilización de un Test de Motivación Intrínseca (Intrinsic Motivation Inventory, IMI) [80], en concreto en las subescalas: "competencia", "interés" y "esfuerzo".

El esquema utilizado fue el clásico pre-test en las sesiones previas a la impartición de clases utilizando la superficie interactiva como material de apoyo, y un post-test tras las sesiones en las que se utilizó el nuevo sistema (el cuestionario IMI se realizó al mismo tiempo que el de usabilidad).

La Tabla 14 muestra los cuestionarios empleados. Cada cuestión fue evaluada sobre una escala Likert de 5 niveles. Todas las cuestiones en el pre-test estaban relacionadas con las cuestiones del post-test en el mismo orden. A modo de ejemplo, la cuestión del pre-test "Creo que soy bueno/a aprendiendo en clase", es equivalente a la cuestión del post-test "Creo que soy bueno/a aprendiendo con el nuevo sistema". Cada cuestionario se puntuó sobre una escala Likert de 5 niveles.

Para el análisis de los resultados se empleó una prueba de t de Student para muestras emparejadas, inicialmente con un intervalo de confianza del 95% ( $\alpha = 0.05$ ). Sin embargo, para evitar el problema de las comparaciones múltiples (también conocido como el problema de los test múltiples) se aplicó una corrección de Bonferroni. Para ello, y teniendo en cuenta que cada criterio (competencia, interés, esfuerzo) es evaluado con un promedio de cinco cuestiones, se utilizó un valor de  $\alpha$  cinco veces menor ( $\alpha_i = 0.01$ ).

Los resultados de la prueba t-Student se recogen en la Tabla 15, que muestra la media de las valoraciones y desviaciones estándar para cada una de las cuestiones, así como el valor del estadístico 't'. Para el test de dos colas con la corrección de Bonferroni se define un valor crítico de 't' igual a 2.85, correspondiendo la hipótesis alternativa a que la valoración de la característica en el post-test es mejor a la valoración en el pre-test, mientras que la hipótesis nula indica que no existen diferencias significativas.

Del análisis de los resultados se desprende una mejoría generalizada en la variable "interés", arrojando diferencias positivas que resultan significativas para todas las cuestiones (Q6..Q10). Es necesario reseñar que la cuestión Q10 debe ser interpretada de forma inversa, es decir, los alumnos indican que se aburren menos utilizando el nuevo sistema frente al desarrollo de las clases tradicionales. Por su parte, en la variable "esfuerzo" muestra una diferencia positiva significativa la valoración de la cuestión Q12, lo que refleja que los alumnos han valorado positivamente la utilización del nuevo sistema y le han dedicado todo su esfuerzo para aprender con él. No se observan diferencias significativas en ninguna de las cuestiones de la variable "competencia", ni en el resto de las cuestiones de la variable "esfuerzo", pero por otra parte es importante destacar la ausencia de resultados negativos que resulten significativos.

<b>Escala IMI</b>	<b>Cuestiones PRE-TEST</b>	
Competencia	Q1	Creo que en soy bueno/a aprendiendo en la escuela
	Q2	Creo que me va muy bien en la escuela, en comparación con mis compañeros.
	Q3	Estoy satisfecho/a con mi rendimiento en la escuela.
	Q4	Creo que me puedo considerar hábil en las tareas de la escuela.
	Q5	Creo que soy muy buen/a alumno/a.
Interés	Q6	Creo que la escuela es bastante agradable
	Q7	Creo que la escuela es muy interesante
	Q8	Creo que la escuela es divertida
	Q9	A menudo pienso sobre lo bien que lo paso en la escuela
	Q10	Creo que la escuela es aburrida
Esfuerzo	Q11	En la escuela lo hago lo mejor que puedo
	Q12	Trabajo muy duro para hacerlo bien en la escuela
	Q13	Es importante para mi trabajar bien en la escuela
	Q14	Dedico mucho esfuerzo en las tareas de la escuela

<b>Escala IMI</b>	<b>Cuestiones POST-TEST</b>	
Competencia	Q1	Creo que en soy bueno/a aprendiendo con el nuevo sistema.
	Q2	Creo que he utilizado el nuevo sistema muy bien, en comparación con mis compañeros.
	Q3	Estoy satisfecho/a con mi rendimiento utilizando el nuevo sistema.
	Q4	Creo que me puedo considerar hábil en el manejo del nuevo sistema.
	Q5	Creo que he sido muy buen/a alumno/a mientras he estado utilizando el nuevo sistema.
Interés	Q6	Creo que el trabajo utilizando el nuevo sistema es bastante agradable.
	Q7	Creo que la utilización del nuevo sistema es muy interesante.
	Q8	Creo que las sesiones de trabajo con el nuevo sistema han sido divertidas.
	Q9	A menudo pienso sobre lo bien que lo he pasado aprendiendo con el nuevo sistema.
	Q10	Creo que las sesiones de trabajo con el nuevo sistema han sido aburridas.
Esfuerzo	Q11	En las sesiones de trabajo con el nuevo sistema lo he hecho lo mejor que he podido.
	Q12	He trabajado muy duro mientras he trabajado con el nuevo sistema.
	Q13	Ha sido importante para mi trabajar bien mientras he estado usando el nuevo sistema.
	Q14	He dedicado mucho esfuerzo mientras he trabajado con el nuevo sistema.

*Tabla 14: Cuestionarios para el test de Motivación Intrínseca.*

Escala IMI		Pre-Test	Post-Test	t
		Media (desv. est.)	Media (desv. est.)	Student
Competencia	Q1	4.11 (0.69)	4.36 (0.87)	1.37
	Q2	3.39 (0.74)	3.50 (0.69)	0.50
	Q3	3.89 (0.74)	4.39 (0.92)	2.32
	Q4	3.96 (0.74)	4.39 (0.74)	2.12
	Q5	3.89 (0.63)	4.11 (0.69)	1.03
Interés	Q6	3.75 (0.84)	4.79 (0.63)	4.96
	Q7	3.54 (0.88)	4.68 (0.72)	4.88
	Q8	3.46 (0.84)	4.82 (0.39)	8.26
	Q9	3.64 (0.87)	4.79 (0.42)	5.61
	Q10	2.50 (0.75)	1.18 (0.55)	7.73
Esfuerzo	Q11	4.32 (0.55)	4.61 (0.69)	1.76
	Q12	4.29 (0.46)	4.89 (0.31)	5.10
	Q13	4.61 (0.50)	4.43 (0.63)	1.30
	Q14	4.36 (0.68)	4.64 (0.56)	1.98

*Tabla 15: Resultados de la prueba t-Student sobre el cuestionario de motivación. Valor crítico de  $t: 2.85$  (test de dos colas)*

#### **4.4.4.- Experiencias adicionales**

Adicionalmente el sistema fue evaluado previamente con un diseño cuasi experimental más sencillo en otros dos centros educativos, también en un contexto real, pero esta vez únicamente para los parámetros de eficiencia y usabilidad/satisfacción. La evaluación siguió el mismo patrón, donde un conjunto de alumnos de 5º curso de Educación Primaria cursaron la unidad temática referente al estudio de los Cuerpos Geométricos utilizando el sistema desarrollado. Estas experiencias se desarrollaron en los centros públicos CEIP Camp de Túria (Centro - 1) y en el colegio El Garbí (Centro - 2), sitios respectivamente en las localidades de Bétera y L'Elia en la Comunidad Valenciana.

Por el mismo motivo que en el caso de la evaluación anterior, no se pudo utilizar a parte de los alumnos como grupo de control con el fin de evitar agravios comparativos entre estudiantes, por lo que en su defecto se utilizó una unidad temática de similares características y complejidad, a criterio de los profesores.

El grupo de estudiantes del "Centro - 1" estuvo formado por un total de 20 alumnos, de los cuales 17 eran chicos y 3 eran chicas. Por su parte, el grupo de estudiantes del "Centro - 2" estuvo formado por un total de 19 alumnos, de los cuales 10 eran chicos y 9 eran chicas.

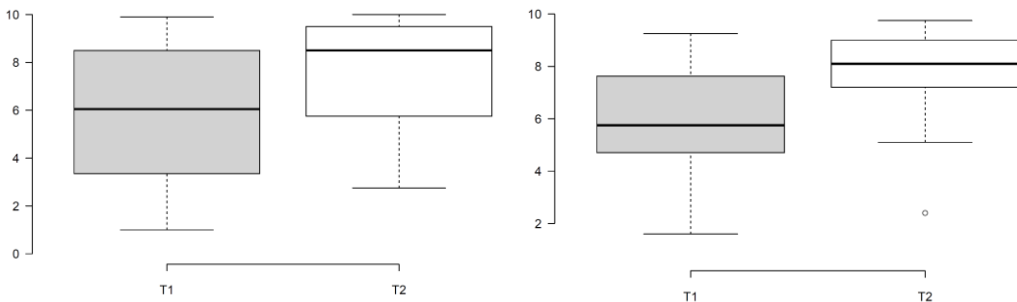
En adelante la unidad temática T1 corresponde a la unidad temática impartida de modo tradicional y T2 a la unidad temática "Cuerpos Geométricos" impartida utilizando en nuevo sistema.

<b>Centro</b>	<b>U.T.</b>	<b>p-valor</b>
Centro - 1	T1	0.873
	T2	0.739
Centro - 2	T1	0.904
	T2	0.172

*Tabla 16: Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov (K-S) para una muestra sobre las calificaciones de los alumnos para cada uno de los centros educativos y de las respectivas unidades temáticas.*

La Tabla 16 recoge los resultados de la aplicación del test de Kolmogórov-Smirnov (prueba K-S) para una muestra, sobre las calificaciones obtenidas por cada estudiante en cada una de las unidades temáticas (T1 y T2) de los respectivos centros. En todos los casos p-valor es mayor al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , por lo que se acepta la hipótesis nula y se entiende que las calificaciones de todas las unidades temáticas siguen una distribución normal.

A la vista de los resultados mostrados en la Figura 33 y en la Tabla 17, se observa que en ambos centros se obtienen calificaciones significativamente superiores en el caso de la unidad temática T2, correspondiente al estudio de "Los Cuerpos Geométricos" y que se cursa utilizando el nuevo sistema desarrollado.



*Figura 33: Diagrama de caja de los resultados obtenidos por los alumnos de ambos centros, "Centro - 1" (izquierda) y "Centro - 2" (dercha), en la evaluación de las unidades temáticas T1 (sombreada) y T2 (sin sombrear).*

	Media T1 (desviación estándar)	Media T2 (desviación estándar)	t Student	Valor crítico para t (prueba de dos colas)
Centro - 1	5.79 (3.07)	7.64 (2.42)	4.09	2.09
Centro - 2	5.97 (2.10)	7.76 (1.79)	4.68	2.10

Tabla 17: Resultados de la prueba t de Student ( $\alpha = 0.05$ ) para cada uno de los centros comparando los resultados de las unidades temáticas T1 y T2.

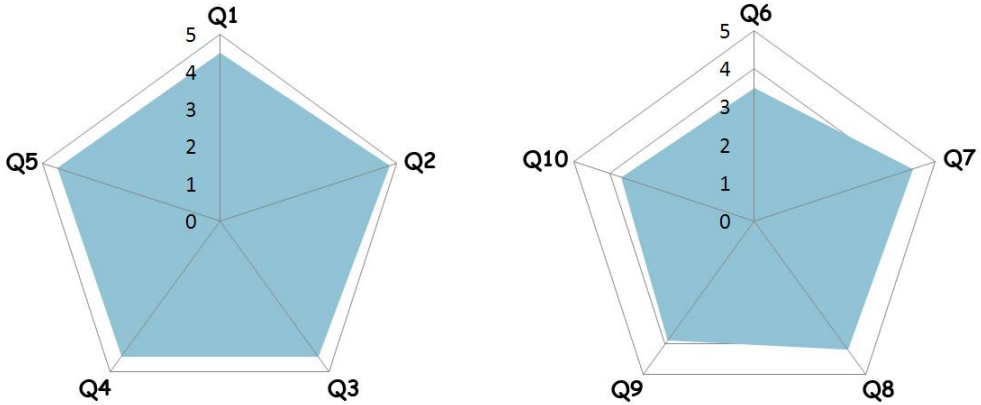
Desde el punto de vista de la usabilidad/satisfacción, se utilizó el mismo cuestionario que el empleado anteriormente. Igual que en el caso anterior, tanto para alumnos como profesores era la primera vez que utilizaban el sistema y no habían recibido ningún tipo de entrenamiento previo.

Los resultados mostrados en la Tabla 18 y en las figuras Figura 34 y Figura 35, arrojan las mismas conclusiones que en el caso del estudio anterior, de las que se puede deducir en líneas generales que el sistema resulta sencillo y agradable de usar, sin generar ningún tipo de interferencia en el proceso docente.

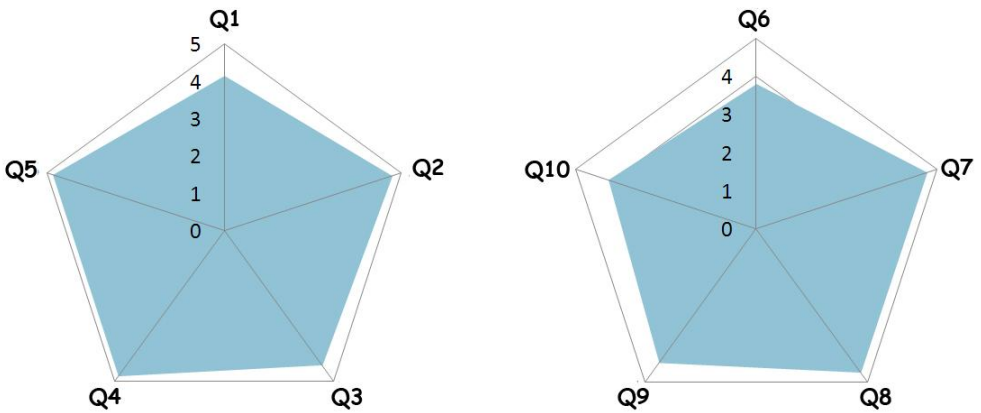
Cuestiones	Centro - 1		Centro - 2		
	Media	Desv. Estándar	Media	Desv. Estándar	
<u>Usabilidad</u>	Q1	4.5	1.08	4.2	0.83
	Q2	4.8	0.42	4.7	0.56
	Q3	4.5	0.71	4.5	0.61
	Q4	4.5	1.27	4.8	0.37
	Q5	4.6	0.84	4.8	0.37
<u>Satisfacción</u>	Q6	3.5	0.97	3.8	0.79
	Q7	4.4	0.96	4.7	0.45
	Q8	4.2	0.92	4.7	0.58
	Q9	3.9	0.86	4.4	0.83
	Q10	3.7	0.95	4.1	0.88

<sup>1</sup> La valoración de esta cuestión se muestra invertida

Tabla 18: Resultados de los test de usabilidad y satisfacción sobre una escala Likert de cinco valores, para ambos centros.



*Figura 34: Representación gráfica de los resultados del test de usabilidad (izquierda) y satisfacción (derecha) para el Centro -1.*



*Figura 35: Representación gráfica de los resultados del test de usabilidad (izquierda) y satisfacción (derecha) para el Centro -2.*

#### **4.5.- Análisis de los resultados y conclusiones**

Uno de los principales objetivos de la investigación consistía en desarrollar un sistema de aprendizaje colaborativo que siguiendo los principios de la computación ubicua ofrezca las ventajas de la utilización de la tecnología a los alumnos pero haciendo que esta pase desapercibida y se integre en su espacio de trabajo habitual, que no requiera entrenamiento

previo mediante la utilización de un interfaz natural y en definitiva que no interfiera en el proceso de enseñanza/aprendizaje.

Los estudios de usabilidad y satisfacción en todos los casos presentan resultados que apoyan esta premisa de partida. Pese a que ni alumnos ni profesores habían utilizado el sistema con anterioridad y a que no habían recibido entrenamiento previo en su manejo, las evaluaciones en todos los casos resultan muy positivas. Casi la totalidad de los estudiantes muestran la preferencia a utilizar este sistema frente a métodos más tradicionales, reconocen que el trabajo con la herramienta les resultó sencillo y natural y creen que les puede ayudar a obtener mejores calificaciones. De igual modo, los alumnos reconocen mayoritariamente que prestaron más atención a las clases en las que se utilizó el sistema interactivo, las cuales les resultaron útiles e interesantes. Especialmente importante resulta el reconocimiento mayoritario de los alumnos en cuanto a que opinan que el nuevo sistema les ayudó a seguir y entender mejor las explicaciones del profesor.

Desde el punto de vista de la motivación de los estudiantes, en los resultados del estudio en el que se midió, se aprecia un notable incremento positivo que resulta significativo para todas las variables de las subescala "interés", y una de las variables de la subescala "esfuerzo".

El incremento de la motivación de los estudiantes junto con los resultados positivos obtenidos en usabilidad y grado de satisfacción justifican una repercusión positiva desde el punto de vista de la eficiencia. En este sentido, las tres experiencias de evaluación reflejan que en todos los casos la utilización de sistema de aprendizaje colaborativo desarrollado, tuvo un impacto significativo y positivo en las calificaciones obtenidas por los alumnos concretamente en la unidad temática referida al estudio de los "Cuerpos Geométricos", que fue sobre la que se aplicó el nuevo sistema.

En resumen, se puede concluir que, en general, el empleo de esta nueva herramienta docente ha conseguido un aumento en la motivación de los estudiantes, sin interferir en el proceso de enseñanza/aprendizaje, y en consecuencia ha derivado en una mejoría en la eficiencia de asimilación de nuevos conocimientos.

Otro elemento reseñable que se extrae del trabajo experimental es el alto grado de colaboración observado entre estudiantes y auto-corrección en la realización de los ejercicios. Durante las sesiones, los profesores estaban tomando un papel secundario durante la mayor parte del tiempo y únicamente entraban en acción cuando era estrictamente necesario. A este respecto, la colaboración entre los estudiantes dispuestos alrededor de la mesa jugaba un papel muy importante, debido a la comunicación retroalimentación de conocimientos que se establecía entre ellos.





## **5.- IMPLEMENTACIÓN DE UN ESPACIO INTERACTIVO BASADO EN EL CONCEPTO DE REALIDAD MEZCLADA DESTINADO A TAREAS DE APRENDIZAJE Y TRABAJO COLABORATIVO EN ENTORNOS DISTRIBUIDOS**

Tal y como se ha descrito en el capítulo anterior, los sistemas "Tabletop" basados en grandes superficies digitales interactivas ofrecen excelentes posibilidades en la creación de espacios de trabajo colaborativos. Este tipo de sistemas, junto con el desarrollo de los interfaces adecuados, ofrecen a los usuarios la posibilidad de operar sobre ellos de modo similar a como se haría sobre un mesa de trabajo tradicional, beneficiándose de las ventajas que aporta la tecnología. Este tipo de interacción con el sistema permite a los usuarios mantener una comunicación permanente entre ellos carente de barreras, en la denominada forma "cara-a-cara".

Por otra parte, el desarrollo de interfaces naturales sobre este tipo de dispositivos, que esconden la complejidad de la tecnología, evita las interferencias que ésta pueda causar en los procesos productivos de sus usuarios o en tareas de aprendizaje colaborativo en entornos educativos. Este tipo de interfaces ofrecen modos de interacción con la tecnología que representan metáforas a operaciones reales que habitualmente empleamos en el mundo físico real para interaccionar con objetos e información. A este respecto, el concepto de "espacio de realidad mezclada" se describe como un entorno de realidad mixta interactivo donde lo físico y lo virtual se combinan a la perfección afectándose mutuamente. Según K. Hoshi et al. [34], en una implementación ideal de este tipo de entornos, la tecnología debería desaparecer por completo de la percepción del usuario. Realmente este tipo de espacios representan un subconjunto del concepto más amplio de "computación ubicua", según el cual los usuarios se benefician de la tecnología sin percibir su presencia [103]. Un ejemplo de desarrollo de este tipo de espacios es el presentado por D. Benyon y O.Mival en [5]. En su trabajo, los autores sugieren que las mesas y escritorios representan medios naturales para actividades cotidianas tales como la composición, la clasificación y el intercambio de información en forma de figuras

complejas y diagramas. Por este motivo implementan un espacio de trabajo colaborativo de realidad mezclada mediante la utilización de sistemas Tabletop. Por su parte, H. Jetter et al. analizan en otro trabajo [37] la utilización de aplicaciones basadas en espacios interactivos de realidad mezclada por distintos grupos de usuarios clasificados por diferentes grados de experiencia, con el objetivo de determinar los factores fundamentales a tener en cuenta en el diseño de este tipo de entornos. En sus conclusiones presentan una propuesta de marco conceptual para el diseño de este tipo de espacios.

En este capítulo se describe el desarrollo de un interfaz especialmente diseñado para ser utilizado sobre dispositivos Tabletop, que permite manipular, organizar y estructurar ítems de información que puede ser textual o gráfica (tanto bidimensional como tridimensional) de un modo genérico. Este interfaz permite crear un entorno de trabajo colaborativo que sigue los principios de los interfaces naturales y los espacios de realidad mezclada. Sobre el modelo de interfaz base se pueden diseñar aplicaciones específicas que amplían las capacidades del sistemas, tales como herramientas para la generación de mapas conceptuales, etc.

Adicionalmente se presenta el desarrollo una tecnología que permite la extensión de estos espacios de trabajo colaborativo locales alrededor de una superficie digital interactiva, en un modelo distribuido que permite la interconexión simultánea de distintos dispositivos, los cuales se pueden encontrar en ubicaciones remotas. De manera global, se genera un espacio de trabajo virtual común al que se conectan los distintos dispositivos permitiendo este tipo de trabajo colaborativo distribuido, y manteniendo al mismo tiempo la capacidad de trabajo en modo local.

## **5.1.- Descripción del sistema**

El sistema desarrollado permite gestionar, organizar y estructurar información gráfica y textual de una forma natural mediante la simulación de una mesa de trabajo tradicional y los métodos de trabajo habituales sobre ella.

La herramienta ha sido diseñada como una aplicación multiplataforma que implementa el protocolo de comunicaciones TUIO [43], lo que garantiza la compatibilidad con la mayoría de los dispositivos basados en superficies multitáctiles interactivas (Tabletops). Este tipo de dispositivos ofrece un interfaz natural que permite a los usuarios utilizar sus propias manos y dedos para interactuar con el sistema, rompiendo la barrera de uso que puede presentar otro tipo de tecnología. Adicionalmente, y como ha sido previamente comentado, este tipo de dispositivos favorecen el trabajo en equipo gracias a que permiten establecer una comunicación entre los usuarios en la forma "cara-a-cara".



*Figura 36: Ejemplo del interfaz del sistema desarrollado, ejecutándose en este caso sobre una superficie interactiva implementada mediante tecnología basada en la utilización de marcos ópticos.*

Por otra parte, con el objetivo de maximizar las posibilidades de utilización, la herramienta se ha desarrollado de modo que resulte compatible con otro tipo de dispositivos, tales como ordenadores personales y computadoras tipo "tablet", ampliando su campo de operación y las posibilidades de orquestación de espacios de trabajo y aprendizaje colaborativo.

### **5.1.1.- Interfaz básico**

El interfaz desarrollado (Figura 36) responde a los principios de diseño en interfaces naturales, ocultando al máximo la complejidad inherente a la tecnología. La estética del mismo es neutra y minimalista, tratando de simular un espacio de trabajo físico real. En definitiva, representa una mesa de trabajo vacía sobre la que se puede depositar y manejar información. Únicamente un par de iconos en la esquina inferior izquierda añaden elementos de interacción digitales (botones).

A nivel lógico, el marco del dispositivo interseca un plano de trabajo virtual (Figura 37), en principio infinito, cuya escala de visualización es modificable. La información digital es depositada sobre este plano virtual. El usuario en cualquier momento tiene la posibilidad de modificar la escala de visualización (operación de

"zoom") y el encuadre del plano respecto al marco del dispositivo. Para ello se utilizan las típicas operaciones gestuales para modificar la escala y ajustar el encuadre de la porción del plano deseada dentro del marco del dispositivo.



+

*Figura 37: Representación del plano de trabajo virtual "infinito", y su intersección con la ventana interactiva correspondiente al marco del dispositivo.*

Para realizar una operación de "zoom" sobre el plano de trabajo, el usuario simplemente debe utilizar dos dedos sobre una zona libre de objetos. Como es habitual, mediante el gesto de separar los dedos se aumenta la escala de visualización y viceversa. Del mismo modo, utilizando un dedo es posible desplazar y encuadrar la zona de trabajo deseada dentro del marco del dispositivo.

Respecto a estas operaciones, con el objetivo de evitar acciones (zoom o encuadre) involuntarias sobre el plano de trabajo, máxime cuando son varios usuarios los que interactúan con el dispositivo de forma simultánea, las operaciones de zoom y encuadre sobre el plano pueden activarse o desactivarse.

A este respecto, un icono con forma de candado, abierto o cerrado, situado en la parte inferior izquierda del marco de dispositivo de forma invariable a la escala de visualización y encuadre, sirve para bloquear o desbloquear respectivamente este tipo de operaciones sobre el plano de trabajo (ver Figura 36).

De este modo, los usuarios son plenamente conscientes de la realización intencionada de estas operaciones, evitando cambios bruscos y fortuitos en la visualización del espacio de trabajo y de los objetos que contiene.

---

### 5.1.2.- Operaciones básicas de manejo y gestión de la información

Sobre los objetos dispuestos sobre el tablero, se pueden realizar operaciones de desplazamiento, escala y rotación, mediante los habituales gestos con las manos.

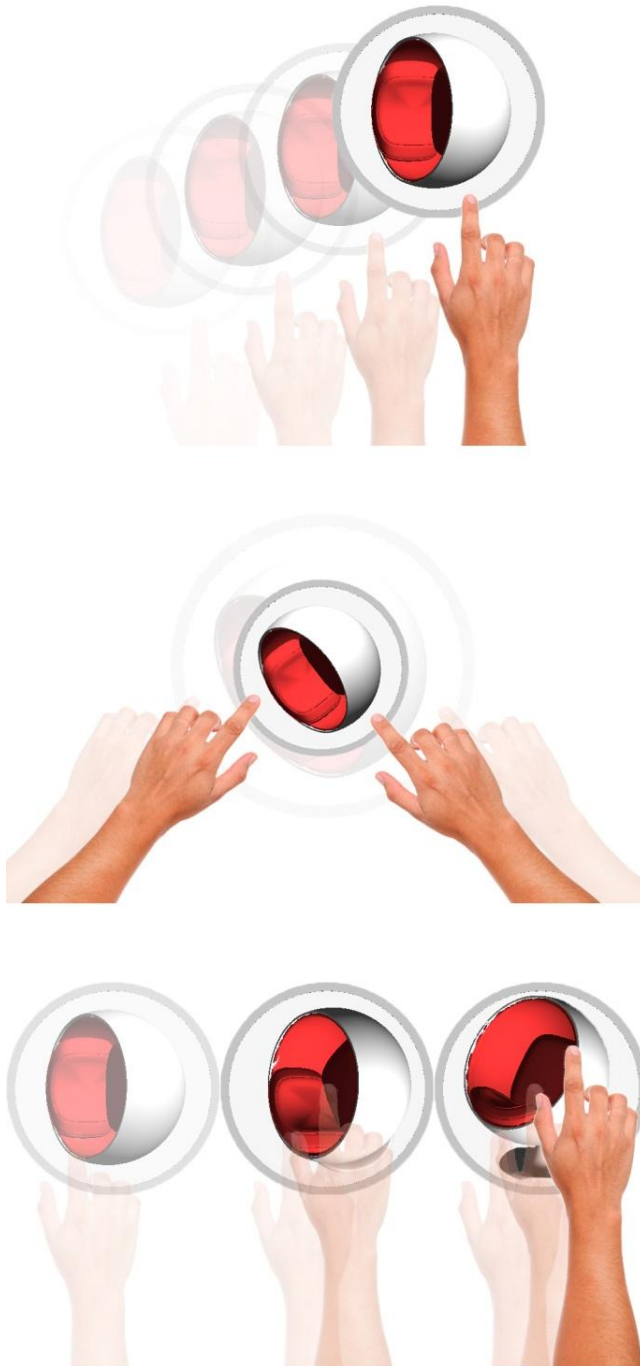
En el caso de información bidimensional, texto o imágenes 2D, se puede desplazar un objeto situando un dedo sobre él y arrastrándolo, mientras que empleando dos dedos se le puede rotar o modificar la escala de representación de una forma muy intuitiva.

En el caso de objetos en geometría 3D, estos aparecen dispuestos siempre en el interior de un círculo, que actúa a modo de peana y que adapta su tamaño automáticamente para recoger todo el objeto. Actuando con un dedo sobre un lugar libre de la peana, es posible desplazar el objeto sobre el plano de trabajo. Por su parte, actuando con un dedo sobre el propio objeto, es posible realizar rotaciones del objeto sobre sí mismo en el espacio 3D, permitiendo observarlo desde cualquier punto de vista. Actuando con dos dedos sobre el objeto o la propia peana es posible aplicar las operaciones de escala y rotación sobre el plano (Figura 38).

Además de las operaciones de traslación, rotación y escalado, descritas anteriormente, el sistema ofrece la operación de borrado de información y las tradicionales de portapapeles: cortar, copiar y pegar.

Para aplicar cualquiera de estas operaciones sobre un objeto, simplemente se debe mantener pulsado con un dedo el objeto durante un corto espacio de tiempo. Tras este intervalo unos iconos representativos de las operaciones aparecen cerca del objeto y se pueden seleccionar. Si transcurrido un intervalo de tiempo no se ha seleccionado ninguno, simplemente vuelven a desaparecer. De modo similar, si se mantiene un dedo pulsado durante un intervalo de tiempo sobre una zona libre del plano de trabajo, en este caso se muestra el icono correspondiente a la operación 'pegar', caso de que previamente se hubiera cargado el portapapeles.

Es importante reseñar que todas estas operaciones tienen carácter multiusuario, por lo que varios usuarios al mismo tiempo pueden estar empleándolas sobre distintos objetos situados en el plano de trabajo.



*Figura 38: Detalle de operaciones gestuales sobre objetos 3D dispuestos sobre el tablero. Arrastre (superior), escala y rotación 2D (centro) y rotación 3D (inferior).*

### 5.1.3.- Estructura básica de la información

La manipulación de la información sobre el tablero simula el comportamiento de información física real sobre una mesa de trabajo. De hecho el manejo de la información, tanto en el caso de ser en origen bidimensional como tridimensional, es inherentemente tridimensional. De este modo, el motor gráfico que mueve el sistema permite simular el comportamiento físico de objetos reales.

Este comportamiento simulado se utiliza para proporcionar una estructura y jerarquía básica a la información dispuesta sobre el tablero virtual. A diferencia de otros sistemas, se propone un mecanismo simple e intuitivo para estructurar la información de una forma básica e intuitiva mediante la simulación los procesos naturales que se producen en un tablero de trabajo físico real.

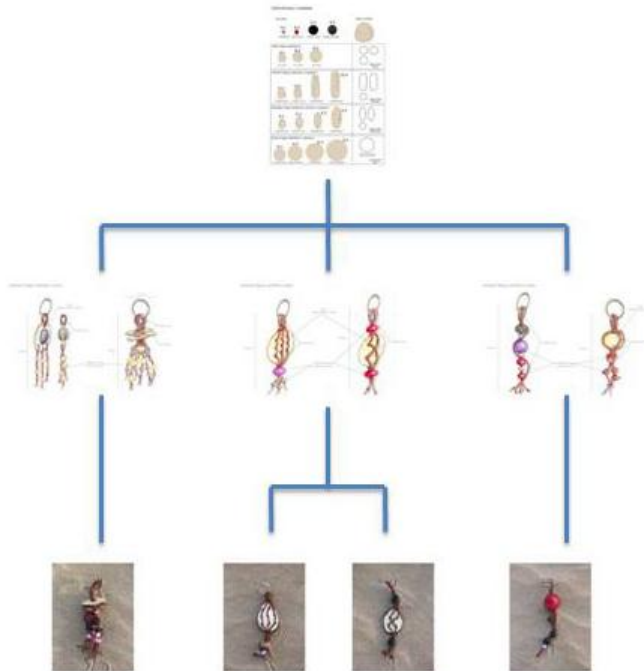
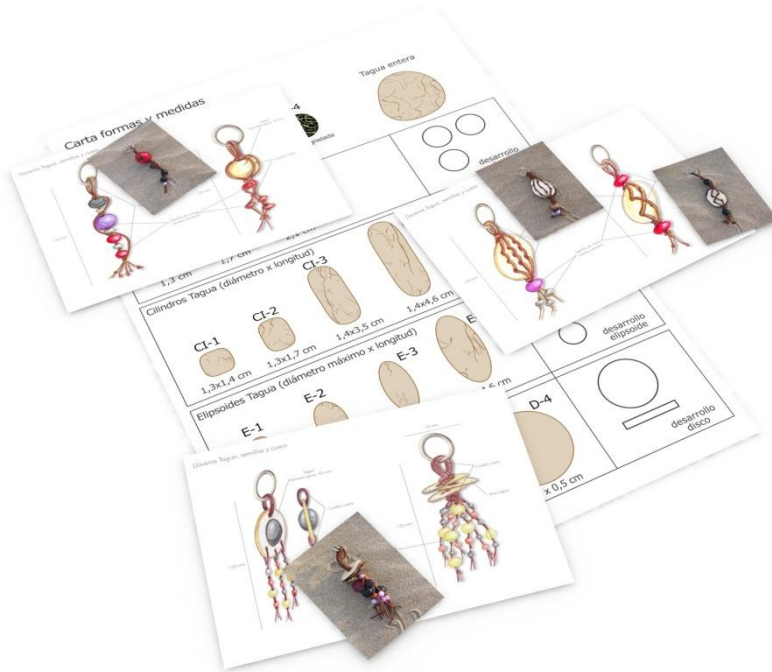
Cuando un usuario prende y arrastra un ítem de información, este se desplaza a un plano virtual superior, simulando que se ha agarrado. Cuando se libera, el documento vuelve a caer sobre el plano de trabajo debido a la gravedad simulada. De este modo, usando la simulación de gravedad y detección de colisiones, se establece una relación básica de jerarquía entre objetos, dado que unos pueden quedar encima de otros (Figura 39). Esta estructura jerárquica se actualiza automáticamente en tiempo real en un archivo XML que se almacena en un servidor de aplicaciones, tal y como se describe en el apartado "Detalles de implementación".

Las operaciones de desplazamiento, rotación y escalado realizadas sobre los objetos "padre", ubicados en los planos inferiores, afectan también a los objetos "hijos" ubicados sobre ellos, tal y como ocurriría en un caso real. Lo mismo ocurre con las operaciones para borrar, cortar copiar y pegar información.

El motivo principal por el que se ha incorporado esta estructura jerárquica básica sobre los ítems de información dispuestos sobre el tablero de trabajo, obedece a los principios de interfaces naturales. Tal y como se describe en trabajos como el presentado por tal y tal [], en un interfaz natural, en el que las acciones representan metáforas de operaciones habituales que se dan en el mundo real, las consecuencias de las mismas también deben ser coherentes con lo que ocurriría en el caso físico real.

De no ser así, se generan frustraciones en el manejo de la información virtual por parte de los usuarios, los cuales se enfrentan a un interfaz que simula la realidad, pero en el que las acciones y consecuencias derivadas de la manipulación de la información no resultan tan creíbles.

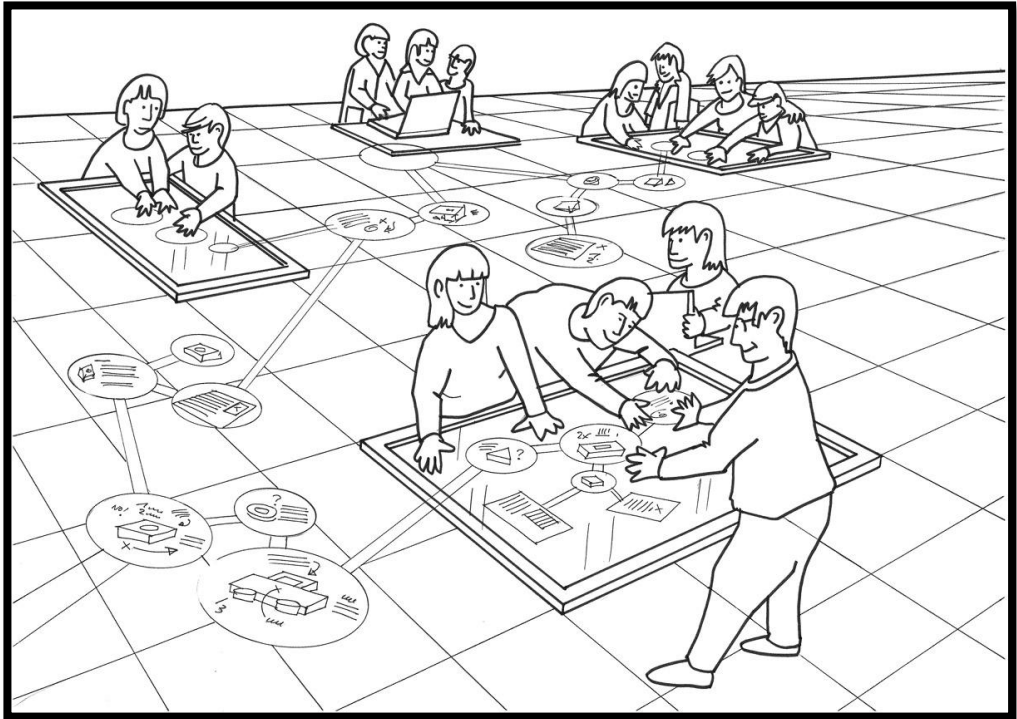




*Figura 39: Ejemplo de estructura jerárquica básica generada por simple apilamiento de la información virtual sobre el tablero digital.*

## 5.2. Modelo de espacio de trabajo colaborativo distribuido

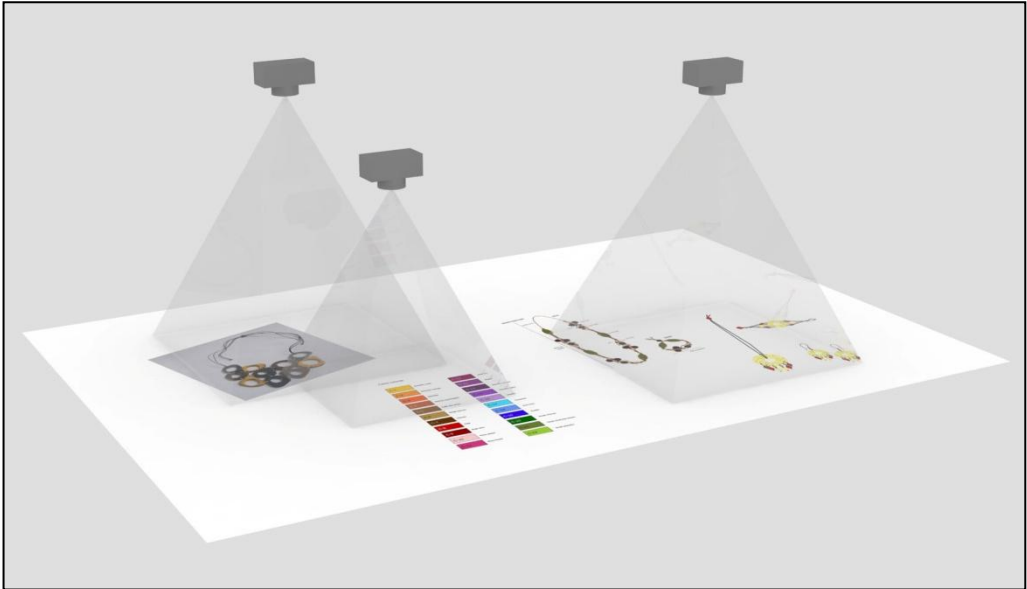
Uno de los principales aspectos de la herramienta desarrollada es que permite de modo nativo extender el modelo de espacio de trabajo colaborativo a un modelo distribuido. En líneas generales, el sistema permite múltiples conexiones de dispositivos al plano de trabajo virtual, abriendo múltiples ventanas interactivas al mismo, tal y como se muestra en la ilustración de la Figura 40.



*Figura 40: Representación del plano de trabajo virtual "infinito", y su intersección con la ventana interactiva correspondiente al marco del dispositivo.*

La utilización del plano virtual compartido por todos los dispositivos permite que el espacio de trabajo sea común a todos los grupos, reforzando la idea de trabajo en equipo y aprendizaje colaborativo.

Realmente cada dispositivo tiene asociada una cámara virtual que encuadra un área del plano de trabajo (Figura 41). La operación de encuadre supone un desplazamiento de la cámara sobre el plano de trabajo, mientras que la operación de zoom supone una modificación en el ángulo de visión. Un mayor ángulo (menor distancia focal) permite visualizar una mayor porción del plano de trabajo y viceversa, con la consecuente modificación en la escala de visualización de los objetos.



*Figura 41: Representación de las cámaras virtuales correspondientes a las porción del porción del plano de trabajo que visualiza y sobre la que centra su trabajo cada grupo de trabajo con su dispositivo interactivo.*

Desde este modo, la visión que dispone cada equipo del plano de trabajo es una visión personalizada. Cada grupo puede elegir la escala de visualización y desplazarse por el plano mediante movimientos gestuales.

Esta funcionalidad permite establecer tres escenarios de trabajo colaborativo diferentes: colaborativo local, colaborativo local extendido y colaborativo distribuido.

### ***5.2.1. Espacio colaborativo local***

El escenario colaborativo local es similar al modelo presentado en el capítulo anterior, en el que varios usuarios se reúnen alrededor de un único dispositivo Tabletop (Figura 42). La principal ventaja de este modelo es que todos los usuarios pueden mantener una comunicación en la forma cara-a-cara, lo cual redundará en un beneficio en las tareas propias del trabajo en equipo.

La implementación de este modelo mediante el sistema desarrollado utiliza un único modelo de cámara visualizando una zona del plano de trabajo, pero manteniendo todas las funcionalidades del sistema. Los usuarios pueden encuadrar y utilizar la escala deseada en la visualización de la información.

El establecimiento de un modelo colaborativo local es totalmente automático, surgiendo simplemente al conectar el dispositivo al sistema. El sistema central se encarga de almacenar toda la información dispuesta sobre el tablero y al mismo tiempo guarda la última pose de la cámara virtual. De este modo, cuando un dispositivo se vuelve a conectar, recupera el mismo estado correspondiente a cuando se desconectó por última vez, ofreciendo a los usuarios una sensación de continuidad en el trabajo.



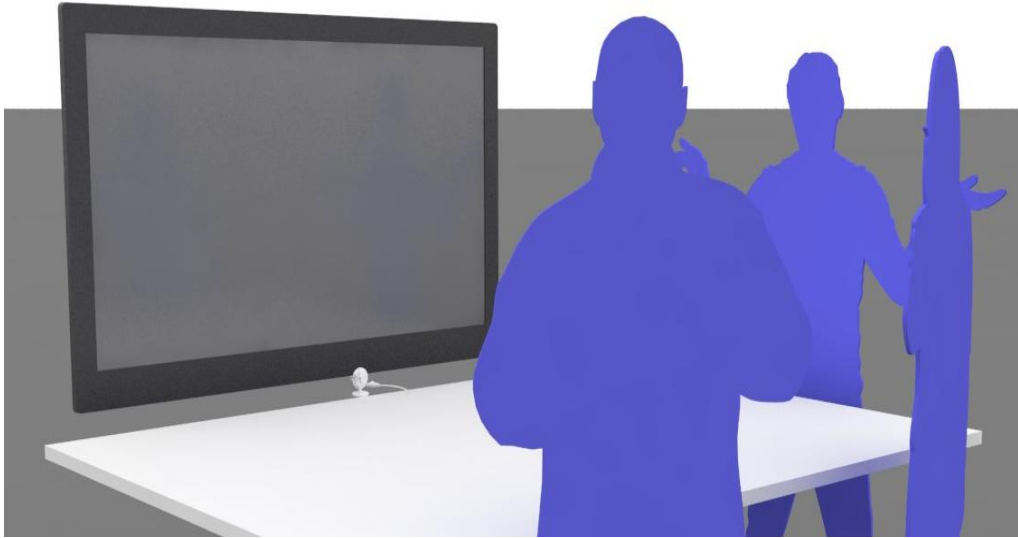
*Figura 42: Varios estudiantes trabajando con la herramienta desarrollada, en modo de colaboración local, sobre un sistema Tabletop.*

### **5.2.2. Espacio colaborativo local extendido**

El modelo de espacio colaborativo local extendido permite interconectar varios dispositivos, simulando que todos ellos trabajan sobre la misma zona de trabajo común.

El caso más interesante de utilización de este modelo corresponde a cuando se interconectan dos o más dispositivos situados en ubicaciones remotas. El modelo de trabajo es muy parecido al del caso local, a excepción del establecimiento de una comunicación "cara-a-cara" entre todos los miembros del equipo de trabajo dado que no se encuentran todos en el mismo espacio físico. Sin embargo este inconveniente puede ser

solventado en parte y de manera sencilla mediante el establecimiento de un sistema de videoconferencia. La Figura 43 ilustra una propuesta de configuración de este tipo.



*Figura 43: Representación de una configuración basada en un sistema tabletop soportada por otro de videoconferencia.*

A nivel lógico la implementación consiste simplemente en ubicar dos cámaras virtuales solapadas que enfocan hacia la misma zona del espacio de trabajo. En este tipo de escenario, las operaciones de encuadre y zoom afectan de manera simultánea a las dos cámaras, de modo que ambas mantengan una pose paralela. De este forma se consigue reforzar la sensación de que los miembros de los respectivos equipos comparten la misma zona de trabajo.

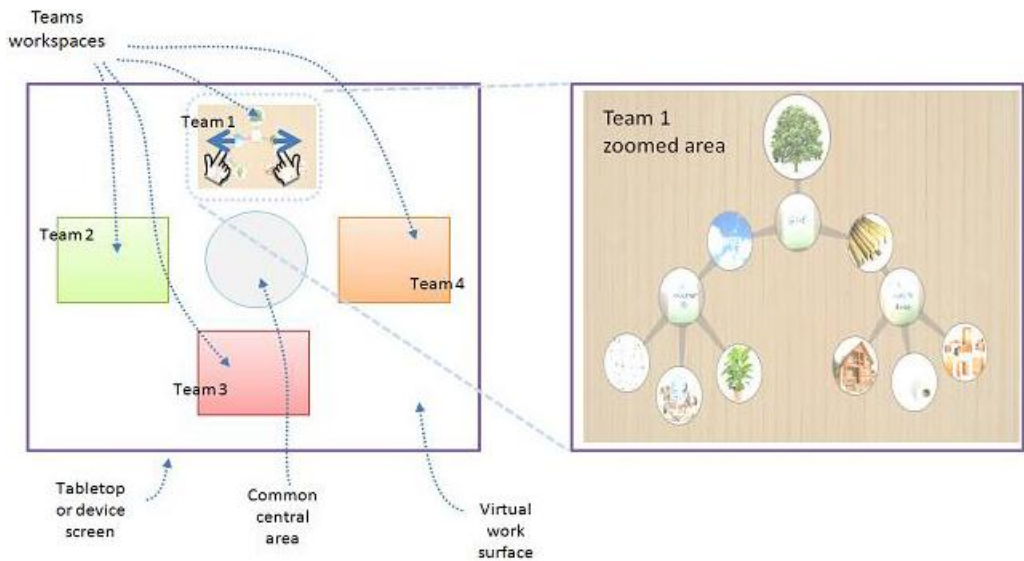
### ***5.2.3. Espacio colaborativo distribuido***

Este caso corresponde al modelo de colaboración más amplio que ofrece la herramienta y que engloba a los dos anteriores.

En un entorno genérico de trabajo colaborativo, la interacción no se limita a los usuarios de un mismo equipo. Por el contrario es habitual y deseable que miembros de un equipo interactúen con miembros de otros equipos. A modo de ejemplo, en un ambiente físico real, los miembros de un equipo suelen consultar y discutir el trabajo realizado por otros grupos simplemente desplazándose a la mesa de trabajo del otro equipo e interactuando con sus componentes.

En este escenario, la herramienta permite simular esta forma de colaboración a través de la representación de una gran superficie de trabajo, tal y como representa la ilustración de la Figura 40. Este gran área de trabajo refuerza la idea de aprendizaje colaborativo, y representa una superficie de trabajo común con independencia de la ubicación de los distintos equipos.

De modo similar a los casos anteriores, el sistema sigue mostrando un interfaz minimalista formado esencialmente por la representación virtual del plano de trabajo (un gran área en blanco). Tal y como se describe de forma más extensa en el apartado "Detalles de implementación", mediante un archivo de configuración inicial en formato XML, residente en el servidor de aplicación, es posible asignar a cada grupo una zona de trabajo inicial, que puede quedar resaltada en un color de fondo identificativo de cada equipo. En el ejemplo presentado en la Figura 44, se han pre asignado cuatro zonas de trabajo correspondiente a respectivos grupos de trabajo, además de una zona común, representada mediante un área circular.

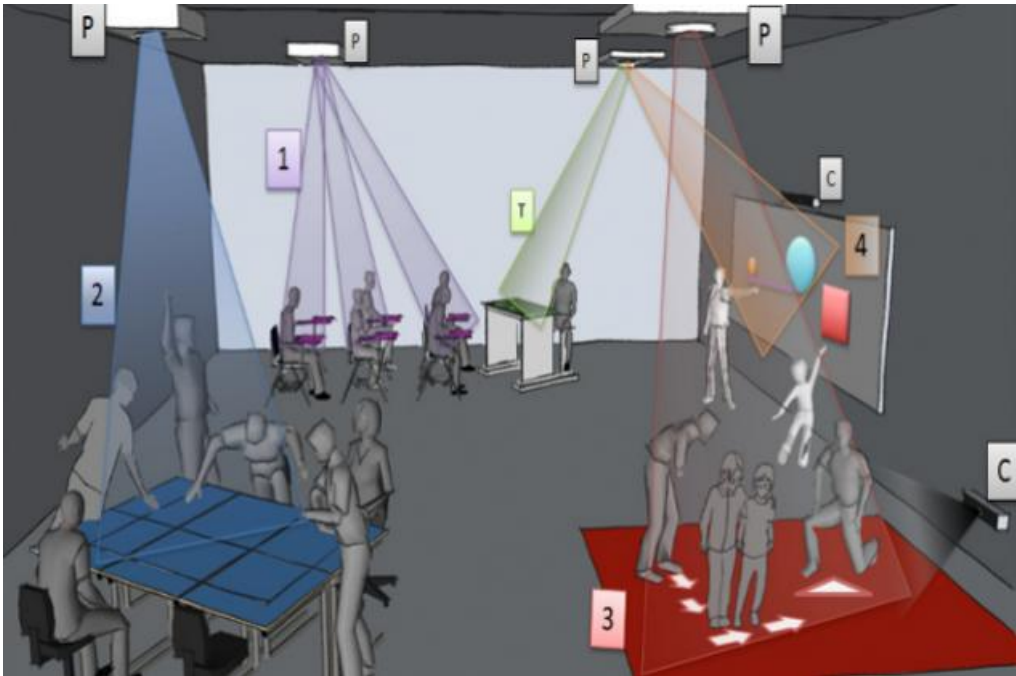


*Figura 44: (Izquierda) Visión completa del plano de trabajo que recoge las respectivas áreas de trabajo asociadas a cada equipo. (Derecha) Simulación de la visualización del área de trabajo correspondiente al "equipo 1" una vez que sus componente han maximizado la escala de visualización para adaptarla a su dispositivo interactivo.*

Sin embargo, es importante destacar que estas áreas pre asignadas únicamente suponen una sugerencia de zonas de trabajo, puesto que los equipos pueden sobrepasar sus límites sin ningún tipo de inconveniente, e incluso solapar dos o más cámaras virtuales estableciendo espacios colaborativos locales extendidos, dentro del modelo global distribuido. Cuando un dispositivo se conecta por primera vez al sistema, su cámara virtual

asociada está configurada para ofrecer una visión completa del plano de trabajo, visualizando todas las zonas de los distintos equipos. Esto proporciona una visión global del espacio colaborativo, sin que ello impida que posteriormente cada equipo elija con operaciones de zoom y encuadre una pose de cámara que abarque su zona de trabajo. A nivel detalle cabe mencionar que el sistema recuerda la última pose de cámara de modo que en una nueva conexión del equipo se muestra el espacio de trabajo tal y como quedó en la última sesión de trabajo.

Esta flexibilidad ofrece múltiples posibilidades de configuración de espacios de trabajo u orquestaciones de aula en entornos educativos basados en paradigmas de aprendizaje colaborativo. La representación de la Figura 45, muestra un ejemplo de orquestación de aula basado en este modelo de espacio de trabajo distribuido, mediante la utilización de superficies interactivas proyectadas implementadas con la tecnología presentada en el Apartado 3.



*Figura 45: Ejemplo de orquestación de aula mediante la utilización de superficies interactivas proyectadas y el modelo de espacio de trabajo colaborativo distribuido.*

Sin embargo, para que un modelo de trabajo colaborativo distribuido como el que se presenta pueda enmarcarse dentro del concepto de Espacios de Realidad Mezclada, el intercambio de información entre los diferentes grupos de trabajo y sus respectivos dispositivos interactivos también debe responder a los principios de los Interfaces

Naturales. Para ello, en este trabajo se han implementado herramientas basadas en interfaces tangibles cuyas características, diseño y funcionalidad se detallan en el Apartado 5 de este documento.

### **5.3. Adición de nueva información al tablero virtual**

El sistema permite manejar información gráfica bidimensional en los principales formatos de imagen (jpg, png, tiff, etc.), ficheros de texto (ASCII) y objetos en geometría 3D en los formatos STL y OBJ (en este último caso incluye texturizado de las superficies).

Uno de los principales objetivos de la investigación consiste en simplificar lo máximo posible el manejo de la información. De este modo el sistema ofrece múltiples formas de introducción de nueva información al sistema, y vías de digitalización de la misma desde el mundo real al espacio digital, contribuyendo a la generación de un "espacio de realidad mezclado".

#### **5.3.1. *Bring Your Own Device (BYOD)***

La estrategia Bring Your Own Device (BYOD) se ha convertido en popular en ambientes empresariales, y en general consiste en que los empleados lleven sus propios dispositivos a su lugar de trabajo para tener acceso a los recursos de la empresa.

Dada la popularidad alcanzada en la actualidad en la utilización de smartphones y dispositivos similares, se ha propuesto la utilización de este tipo de dispositivos como vía principal de entrada de información al espacio digital colaborativo distribuido. De este modo, cada usuario utiliza su propio dispositivo, con el que está habituado y familiarizado en el manejo, para añadir información al espacio digital.

Adicionalmente, mediante esta forma de interacción, se consigue ahorrar un valioso espacio de trabajo sobre los dispositivos Tabletop, que tradicionalmente suelen incorporar teclados simulados digitales que ocupan una gran zona del tablero. Otro efecto positivo destacable es que permite deslocalizar la anexión de nueva información, de modo que un usuario puede añadir nuevos contenidos aunque no se encuentre cerca del dispositivo, incluso desde lugares remotos siempre que su smartphone disponga de conectividad a red.

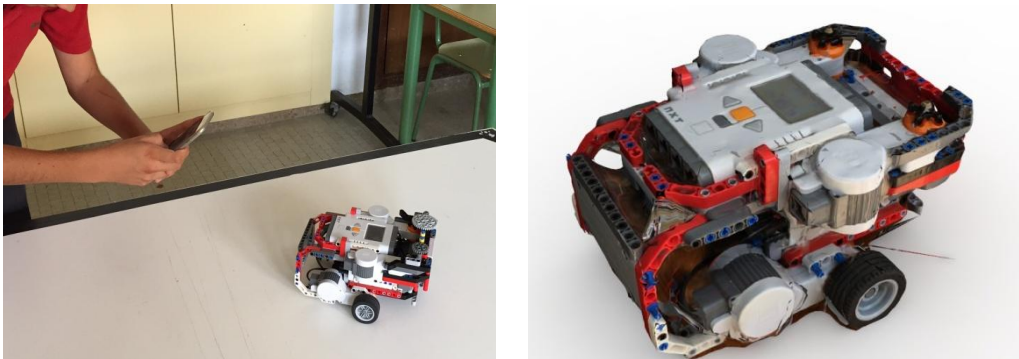
Una de las posibilidades que ofrece el sistema para añadir nueva información al sistema consiste en la utilización de la red social Twitter para el envío de información al plano de trabajo, concretamente pequeños textos e imágenes. La aplicación cliente de Twitter para smartphones es gratuita y está disponible para los principales sistemas



operativos de estos dispositivos, y en general su utilización suele ser muy común entre el colectivo de estudiantes.

En una tarea previa, el administrador del sistema o incluso el propio profesor mediante una aplicación creada específicamente, asocia un hashtag<sup>1</sup> a cada dispositivo tabletop. Como se describe posteriormente en la arquitectura del sistema, un proceso monitorea continuamente la llegada de nuevos Tweets asociados a los hashtag de cada dispositivo. Haciendo uso del API de Twitter, el proceso extrae la información recibida en nuevos tweets (texto y/o imágenes) conforme van llegando y la deposita en el tabletop asociado al hashtag al que va dirigida.

De este modo para añadir nueva información al sistema el alumno simplemente debe enviar un tweet precedido del hashtag asociado al dispositivo. Así, utilizando la propia cámara del dispositivo es muy sencillo incorporar información del mundo real al espacio digital, por ejemplo tomando una foto de una ilustración en un libro, o de unas notas manuscritas, un paisaje, etc...



*Figura 46: Alumno escaneado la geometría 3D de un objeto con su propio smartphone utilizando la aplicación "123D Catch" de Autodesk (izquierda) y geometría en formato OBJ obtenida como resultado (derecha).*

Alternativamente también se puede añadir nueva información utilizando el correo electrónico, pudiéndose asignar una dirección al sistema y un identificador a cada dispositivo que se debe incluir en el asunto del mensaje (una buena idea puede ser la utilización de los mismos hashtags a los empleados en el caso de utilizar Twitter). De nuevo un proceso del sistema monitorea continuamente la llegada de nuevos correos

---

<sup>1</sup> Un **hashtag** es una cadena de caracteres formada por una o varias palabras concatenadas y precedidas por una almohadilla o numeral (#). Es, por lo tanto, una etiqueta de metadatos precedida de un carácter especial con el fin de que tanto el sistema como el usuario la identifiquen de forma rápida. Se usa en servicios web tales como Twitter, Telegram, Facebook, Google+, etc., para señalar un tema sobre el que gira cierta conversación.

electrónicos y automáticamente extrae la información (texto, imágenes y objetos 3D) depositándola respectivamente en la ubicación del plano asociada en ese momento al dispositivo al que va dirigido. Mediante la utilización de mensajes de correo electrónico se pueden enviar todos los tipos de información que soporta el sistema. El texto se extrae tanto del cuerpo del mensaje como de posibles archivos de extensión "txt" y codificados en ASCII adjuntos, dando lugar a diferentes ítems de información sobre el tablero. Las imágenes y objetos 3D se deben enviar siempre como archivos adjuntos, que el sistema identificará tratará en cada caso analizando su extensión. La recepción de cualquier otro tipo de información simplemente es ignorada.

La Figura 46 muestra el ejemplo de un alumno escaneado un objeto tridimensional utilizando para ello su propio teléfono móvil y la aplicación "123S Catch" de Autodesk. La aplicación permite descargar la geométrica escaneada en formato OBJ, el cual es compatible con el sistema desarrollado. Para introducirla en el sistema simplemente se debe enviar un mail la dirección asociada al tabletop, que incluya como el fichero OBJ como adjunto.

### ***5.3.2. Escaneado automático de imágenes desde el propio Tabletop***

Una forma natural de introducción de nueva información gráfica al sistema, y que refuerza la idea de espacio de realidad mezclada, consiste en el escaneado automático de documentos reales al colocarlos sobre la superficie interactiva y su consecuente conversión al espacio digital. Para ello el dispositivo Tabletop empleado debe contar con una cámara física real situada en posición cenital sobre el tablero de la mesa. En el caso de la utilización del sistema Tabletop presentado en el Capítulo 2, el sistema utiliza automáticamente una de sus dos cámaras para esta tarea.

El usuario puede escanear una imagen real simplemente colocándola sobre la mesa y haciendo clic en un icono que representa una cámara en la esquina inferior derecha del tablero. Al pulsar el botón, la cámara captura la imagen y tras los procesos automáticos de segmentación y corrección de perspectiva, coloca una copia digital en el plano de trabajo con el mismo tamaño, posición y orientación que el original (Figura 47).

El sistema requiere un calibrado inicial de la cámara, que se realiza de forma totalmente automatizada al instalar por primera vez el equipo. Para ello el sistema proyecta un patrón ajedrezado sobre su superficie, que a su vez es captado por la cámara. La comparación entre el patrón proyectado y la visión de él obtenida por la cámara permite calcular las transformaciones necesarias en la imagen para corregir la distorsión de la cámara (cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos) y la correlación en la imagen capturada y el marco del dispositivo mediante el cálculo de la matriz de homografía. La calibración de cámara sigue los mismos procedimientos a los que se describen en [13].

Para facilitar la segmentación de imágenes en el tablero de la mesa, el proyector se desconecta momentáneamente (es decir, se queda en negro) cuando se hace clic en el icono de la cámara, garantizando que la imagen es escaneada sobre un fondo uniforme, lo que permite encontrar de un modo más robusto su contorno, mediante la aplicación de los algoritmos de Canny [14] y la transformación probabilista de Hough [58]. Una vez detectado el contorno, la imagen puede ser segmentada del fondo, y tras aplicar la matriz de homografía calculada en el proceso de calibración, su perspectiva y posición son corregidas de modo que la imagen virtual queda en la misma posición, orientación y tamaño que ocupaba la imagen real sobre el tablero.

Tanto para los procedimientos de calibración de cámara, cálculo de matriz de homografía y algoritmos de segmentación de imagen, se utilizan sus respectivas implementaciones en la librería gráfica y de visión artificial OpenCV<sup>1</sup> [10].



*Figura 47: Ejemplo de imagen escaneada e introducida automáticamente al espacio de trabajo digital mediante la utilización de una cámara en posición cenital.*

---

<sup>1</sup> **OpenCV** (Open Source Computer Vision) es una biblioteca libre de visión artificial en tiempo real, originalmente desarrollada por Intel.

Cabe destacar que, aunque la arquitectura del sistema depende de un servidor de aplicación (tal y como se describe en el siguiente punto), estos procesos de cálculo se realizan en el computador asociado al dispositivo cliente. Una vez obtenida la imagen, y corregida su posición, orientación y perspectiva, esta es enviada al computador central (que alberga el servidor de la aplicación) el cual se encarga de ubicarla en la posición correcta del plano de trabajo. Una vez colocada en plano de trabajo, el propio motor de gráficos del servidor de aplicación es el encargado de remitir una instancia de la misma al resto de ordenadores clientes conectados al sistema, incluido el que se utilizó para capturar la imagen y que la mostrará en su dispositivo Tabletop asociado. De hecho, todos los dispositivos que en ese momento estén encuadrando la zona del plano de trabajo, también verían la nueva imagen capturada sobre sus propios dispositivos (y la podrían manipular).

## 5.4. Arquitectura del sistema y detalles de implementación

### 5.4.1. Motor de gráficos y de físicas

El sistema está desarrollado sobre el motor de gráficos y videojuegos Unity<sup>1</sup>. La utilización de este motor permite por una parte simplificar la programación y el tratamiento de información gráfica 3D. Aunque el sistema permite manejar tanto información 2D como 3D, su tratamiento siempre es 3D, lo que permite implementar la funcionalidad del interfaz descrito en el apartado anterior (4.1.1.- Interfaz básico), que simula a los procesos reales en el manejo de información física.

Unity, además del motor gráfico, incorpora un motor físico<sup>2</sup> que permite simular el comportamiento real de los objetos, simulando de forma realista colisiones, gravedad, etc. Esta funcionalidad ha sido utilizada para simular el comportamiento físico de los objetos virtuales.

El sistema de coordenadas asociado a las superficies interactivas es dextrógiro, tal y como se muestra en la figura. De este modo, cuando se selecciona un objeto, éste se desplaza a un plano superior (desplazamiento en Z) por encima del resto de objetos dispuesto sobre el tablero. Al dejar de seleccionarlo, el objeto cae por simulación de la gravedad, pudiendo quedar sobre el propio tablero o bien sobre algún otro objeto o grupo de objetos que quedases por debajo. Esta funcionalidad permite establecer la estructura

---

<sup>1</sup> **Unity** es un motor de videojuego multiplataforma creado por Unity Technologies. Unity está disponible como plataforma de desarrollo para Microsoft Windows, OS X y Linux, y permite crear juegos para Windows, OS X, Linux, Xbox 360, PlayStation 3, PlayStation Vita, Wii, Wii U, iPad, iPhone, Android y Windows Phone.

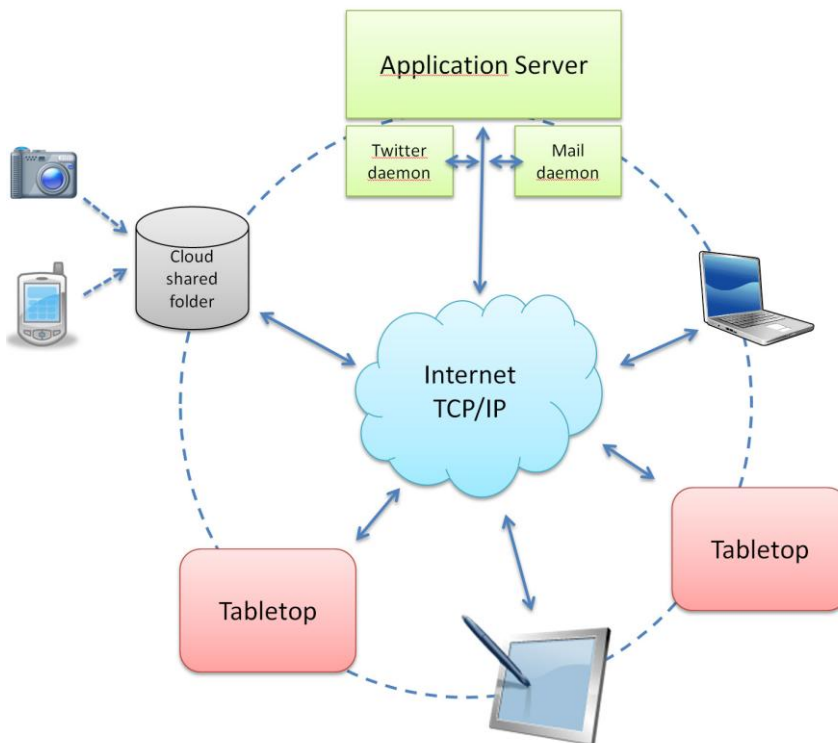
<sup>2</sup> Un **motor físico** (Physics engine) es una expresión empleada en informática para referirse a un software capaz de realizar simulaciones de ciertos sistemas físicos como la dinámica del cuerpo rígido, el movimiento de un fluido y la elasticidad. Se emplean sobre todo en el desarrollo de simuladores y videojuegos.

básica descrita en el apartado (4.1.1.- Interfaz básico), actualizando en tiempo real un fichero XML que almacena la relación jerárquica entre los objetos del plano de trabajo.

#### **5.4.2. Arquitectura distribuida y multiplataforma**

Por otra parte, en la implementación del espacio de trabajo colaborativo distribuido también se han aprovechado las características del motor de videojuegos. Unity incorpora un potente interfaz de red originalmente desarrollado para la programación de videojuegos del tipo multijugador, donde varios jugadores se conectan a un servidor a través de una red de comunicaciones, pudiendo jugar de forma simultánea en un espacio de juego común.

En el presente trabajo, esta característica de Unity ha sido utilizada en la implementación de la lógica subyacente al plano de trabajo colaborativo. En cierto modo, el plano de trabajo sería el equivalente al espacio en el que se desarrolla el videojuego, mientras que cada dispositivo conectado al mismo haría las veces de un jugador.



*Figura 48: Detalle de la estructura del sistema a nivel de su arquitectura.*

La arquitectura del sistema es distribuida, y consta de un servidor de aplicación en el que reside toda la lógica del sistema, así como toda la información añadida al plano de trabajo. A través de una red de comunicaciones TCP/IP, el computador asociado a cada dispositivo Tabletop se conecta con el servidor de la aplicación y se convierte automáticamente en un cliente del sistema.

Toda la información añadida al sistema reside en el servidor de aplicación. Por su parte, cada cliente recibe una instanciación de la misma, de modo que la acción que realiza un usuario sobre un objeto tiene lugar realmente en el servidor de aplicación. Básicamente, el cliente envía la acción al servidor, el cual actualiza en consecuencia el estado de la información depositada sobre el plano de trabajo y envía esta actualización de nuevo a todos los clientes conectados al mismo, los cuales ya la representan sobre sus pantallas. De este modo, la acción de un usuario sobre un Tabletop es visible en el resto de Tabletops conectados al sistema.

Otra ventaja aportada por el motor de videojuegos es su característica multiplataforma. Aunque el sistema ha sido desarrollado en Microsoft Windows, Unity permite exportarlo a las otras principales plataformas, tales como OS X, Linux, IOS y Android, entre otras.

Por otra parte, la aplicación del lado de los clientes se ha desarrollado de modo que es compatible con el protocolo TUIO [43], reconocido como un estándar, lo cual a su vez la convierte en compatible con la mayoría de los sistemas Tabletop, marcos ópticos y otras tecnologías destinadas a la implementación de grandes superficies interactivas.

### ***5.4.3. Procesos demonio para E-Mail y Twitter***

El servidor de aplicación implementa dos procesos demonio encargados de muestrear la llegada de nuevos mensajes de correo electrónico y Twitter, respectivamente, y de extraer la información de los mismos conforme a su llegada, depositándola sobre el plano de trabajo. El propio motor de red de la aplicación se encarga de hacerla visible para todos los dispositivos cliente conectados.

Cada dispositivo conectado al sistema tiene asignado un identificador, definido por el administrador del sistema en el archivo XML de configuración. En la configuración previa del sistema, el administrador del mismo es responsable de crear el fichero de configuración, en el que se identifica a cada dispositivo (grupo de trabajo) y de forma paralela respectivas cuentas de correo electrónico asociadas a cada dispositivo. Estas cuentas de correo pueden crearse en cualquier plataforma, ya sea un servidor de correo privado o uno público. A modo de ejemplo se podrían crear cuentas GMail asociadas a cada uno de los dispositivos (vg: tabletop\_1.workspace\_1@gmail.com). El servicio demonio del servidor de aplicación se encarga de muestrear estas cuentas, detectando la

llegada de nuevos mensaje y extrayendo la información de los mismos. Puesto que cada cuenta pertenece a un grupo, el sistema es capaz de identificar el dispositivo asociado y depositará la información en la zona del plano de trabajo que quede justo debajo de la posición actual de la cámara virtual asociada al dispositivo cliente. De esta forma, el sistema siempre depositará la nueva información enviada por un grupo de trabajo, sobre la zona del plano en la que esté trabajando en ese momento.

De forma similar, el administrador del sistema es el encargado de asociar una cuenta Twitter a cada dispositivo, y actualizar esta información en el fichero de configuración. El servicio demonio del servidor de aplicación asociado a los mensajes Twitter se encarga de monitorizar continuamente cualquier cambio, extrayendo la información y depositándola sobre el plano de trabajo de igual modo que en el caso del correo electrónico.

#### **5.4.4. Estructuras de datos**

Toda la información añadida al sistema se almacena en una carpeta del servidor de la aplicación. La estructura de la misma se define automáticamente en un archivo XML, en el que se definen las relaciones jerárquicas entre los distintos ítems de información, así como sus posiciones sobre el plano, escalas y orientaciones. En el caso de objetos de geometría 3D se almacena adicionalmente las rotaciones alrededor de sus ejes X, Y, Z.

Por cada ítem de información se almacena adicionalmente el identificador del equipo (dispositivo) que lo generó, a efectos de posteriores análisis para evaluación del trabajo y datos estadísticos. De igual modo se almacena el medio por el que se envió la información (email, twitter o cámara cenital).

Por otra parte, el archivo XML de configuración, el cual es gestionado por el administrador del sistema, recoge información general del espacio de trabajo. A nivel general, se define el tamaño del plano (en unidades genéricas), la altura sobre el plano a la que se encuentran las cámaras virtuales asociadas a cada dispositivo y el color de fondo.

Por cada dispositivo se crea una entrada que a su vez define su identificador, hashtag de twitter y cuenta de correo electrónico asociada. Adicionalmente puede definir un area de trabajo opcional asociada al equipo, definida por sus dos esquinas opuestas y un color de fondo identificativo.

Adicionalmente, por cada equipo se almacena la posición de la cámara (X, Y) sobre el plano (la cámara siempre está orientada de manera normal al plano de trabajo, y la distancia al mismo se establece para todas en igual en configuraciones generales), así como el ángulo de visión de la misma. De este modo, cuando se retoma una sesión de trabajo, los usuarios reciben el mismo estado en el que dejaron el trabajo.

**Configuración del espacio de trabajo**

**Base de datos de la información**

```

<WORKSPACE>
  <WIDTH>10000.0</WIDTH>
  <HEIGHT>10000.0</HEIGHT>
  <COLOR>FFFFFF</COLOR>
  <TEAM>
    <ID>#TABLETOP_1</ID>
    <AREA>
      <X1>10.0</X1>
      <Y1>10.0</Y1>
      <X2>1000.0</X2>
      <Y2>1000.0</Y2>
      <COLOR>00AA00</COLOR>
    </AREA>
    <VIEW>45.0</VIEW>
    <PAN>
      <X>500</X>
      <Y>500</Y>
    </PAN>
  </TEAM>
  <TEAM>
    <ID>#TABLETOP_2</ID>
    <AREA>
      <X1>3000.0</X1>
      <Y1>10.0</Y1>
      <X2>4000.0</X2>
      <Y2>1000.0</Y2>
      <COLOR>0000AA</COLOR>
    </AREA>
    <VIEW>45.0</VIEW>
    <PAN>
      <X>3500</X>
      <Y>3500</Y>
    </PAN>
  </TEAM>
</WORKSPACE>

<DATA>
  <ITEM>
    <ID>1</ID>
    <ID_TEAM>#TABLETOP_1</ID_TEAM>
    <ID_BYOD>3</ID_BYOD>
    <ID_ORIGIN>mail</ORIGIN>
    <FILE>sample_1.jpg</FILE>
    <TYPE>jpg</TYPE>
    <X>100.0</X>
    <Y>200.0</Y>
    <2D_ROTATION>33.0</ROTATION>
    <3D_ROTATION>
      <X>0.0</X>
      <Y>0.0</Y>
      <Z>0.0</Z>
    </3D_ROTATION>
    <ESCALE>3.75</SCALE>
  </ITEM>
  <ITEM>
    <ID>3</ID>
    <ID_TEAM>#TABLETOP_1</ID_TEAM>
    <ID_BYOD>3</ID_BYOD>
    <ID_ORIGIN>twitter</ORIGIN>
    <FILE>sample_2.jpg</FILE>
    <TYPE>jpg</TYPE>
    <X>120.0</X>
    <Y>230.0</Y>
    <2D_ROTATION>-15.0</ROTATION>
    <3D_ROTATION>
      <X>0.0</X>
      <Y>0.0</Y>
      <Z>0.0</Z>
    </3D_ROTATION>
    <ESCALE>2.25</SCALE>
  </ITEM>
  <ITEM>
    <ID>2</ID>
    <ID_TEAM>#TABLETOP_2</ID_TEAM>
    <ID_BYOD>2</ID_BYOD>
    <ID_ORIGIN>mail</ORIGIN>
    <FILE>sample_text.txt</FILE>
    <TYPE>txt</TYPE>
    <X>500.0</X>
    <Y>600.0</Y>
    <2D_ROTATION>0.0</ROTATION>
    <3D_ROTATION>
      <X>0.0</X>
      <Y>0.0</Y>
      <Z>0.0</Z>
    </3D_ROTATION>
    <ESCALE>10.0</SCALE>
  </ITEM>
</DATA>

```

*Tabla 19: Ejemplo de orquestación de aula mediante la utilización de superficies interactivas proyectadas y el modelo de espacio de trabajo colaborativo distribuido.*



## **5.5. Prueba piloto**

### **5.5.1. Contexto**

El sistema se testó en una primera prueba piloto en el contexto de un proyecto internacional de diseño colaborativo. El proyecto, denominado "Free Design Bank" ([www.freedesignbank.org](http://www.freedesignbank.org)), es un proyecto real que reúne a equipos de diseñadores de todo el mundo con el objetivo de crear nuevos productos. Se trata de un proyecto de cooperación, cuya finalidad consiste en utilizar el diseño como medio de cooperación con artesanos de países en vías de desarrollo.

Cerca de 200 estudiantes voluntarios han tomado parte en el proyecto desde 1998. "Free Design Bank" mantiene una página web sin ánimo de lucro que conecta a grupos de artesanos de todo el mundo con escuelas de diseño industrial con el objetivo de recibir asistencia y asesoramiento. La organización se encarga de involucrar estudiantes de diseño en este tipo de programas, con el objetivo de colaborar con grupos de artesanos de países en vías de desarrollo.

El objetivo del "Free Design Bank" consiste en acercar los procesos propios implicados en el diseño de productos a las comunidades con menos recursos a lo largo del planeta, donde la producción se basa mayoritariamente en prácticas tradicionales y es desarrollada por artesanos locales. En estas situaciones, la evolución de los productos a lo largo de los años es virtualmente inexistente, lo cual convierte a estas comunidades en menos competitivas confinándolas a los pequeños mercados locales. La introducción del concepto de diseño puede ayudar a convertir estos productos en más atractivos en mercados más amplios. Uno de los principales objetivos del proyecto consiste en mantener los mismo materiales, procesos de fabricación, herramientas y artesanos en el desarrollo de los nuevos productos, introduciendo los nuevos conceptos de diseño como una herramienta para la evolución de los productos.

A lo largo de los últimos años el proyecto ha ido crecido gradualmente, incorporando además de estudiantes a numerosos grupos y estudios de diseño profesionales. Aunque el incremento en recursos humanos ha permitido la participación del proyecto en un número cada vez mayor de actividades, también ha generado una complejidad creciente las tareas de gestión y manejo de la información del proyecto, particularmente teniendo en cuenta que los grupos de estudiantes y estudios de diseño profesionales se encuentran localizados en diferentes ciudades y países.

Por este motivo, los responsables del proyecto se interesaron en encontrar una solución tecnológica, que resultando poco invasiva en los procesos de diseño, permitiese gestionar mejor los mismos, y el tratamiento de la información en ellos implicada. Finalmente se optó por la utilización de la herramienta propuesta en este capítulo.

### 5.5.2. Metodología

El sistema descrito se utilizó experimentalmente a lo largo del año académico 2012-2013. En la prueba se involucraron tres equipos de diseñadores y un grupo de artesanos de Perú especializados en la producción de objetos utilizando nueces de Tagua como materia prima.

Los tres equipos de diseño involucrados en la experiencia fueron respectivamente, miembros del estudio “Join Design” de Valencia, miembros del estudio “Laselva Studio” que trabajaron desde Londres, y un grupo de profesores y alumnos de Diseño Industrial de la Universidad Cardenal Herrera - CEU, quienes además se encargaron de coordinar el proyecto.

El servidor de aplicación se instaló en dependencias de la Universidad y se proporcionó acceso al mismo a todos los equipos de trabajo implicados. En la experiencia, tanto el equipo de la Universidad como los miembros del estudio "Join Design" de Valencia utilizaron Tabletops, mientras que los equipos que trabajaron desde Londres utilizaron la aplicación desde sus propios ordenadores personales. La implementación de los dos Tabletops utilizados en la experiencia estuvo basada en la utilización de pantallas de televisión planas de 55" y marcos ópticos multitáctiles compatibles con interfaz TUIO. Para la adición de nueva información, todos los usuarios emplearon sus propios smartphones o computadores personales, utilizando en ambos casos tanto e-mail como la red social Twitter. Paralelamente se establecieron regularmente videoconferencias utilizando las aplicaciones genéricas más habituales.



*Figura 49: Responsable del proyecto entrevistándose con un grupo de artesanos en Ecuador.*

La experiencia se desarrolló en tres etapas. En la primera, un grupo de estudiantes de diseño industrial de Valencia, visitaron Ecuador con el objetivo de recolectar información acerca de los materiales empleados tradicionalmente por los artesanos. Esta información era añadida al espacio de trabajo prácticamente en tiempo real, utilizando principalmente smartphones y ordenadores portátiles y empleado el correo electrónico como medio principal de envío. De este modo, la información recolectada podía ser analizada rápidamente por el resto de equipos de trabajo desde Europa. Paralelamente se mantuvieron reuniones virtuales utilizando sistemas de videoconferencia conjuntamente con la herramienta de trabajo colaborativo desarrollada, la cual demostró resultar de gran utilidad en la primera fase de exploración, intercambio y análisis de la información.

En una segunda etapa, cada equipo de trabajo se dedicó a trabajar de modo colaborativo local, copiando la información necesaria a su área de trabajo y añadiendo la nueva que iba generando su propia labor (esquemas, propuestas de diseño imágenes de bocetos, etc.). Para ello, previamente el administrador del sistema había configurado el sistema para asignar una zona del plano de trabajo a cada equipo, identificada mediante un color. Cabe recordar que la asignación de estas zonas de trabajo es únicamente a efectos orientativos, pudiendo cada equipo sobrepasar sus límites o incluso trabajar fuera de ella sin ningún tipo de restricción. Además de las tres áreas de trabajo correspondientes a cada uno de los estudios de diseño y grupos de diseñadores implicados en la experiencia, se reservó una cuarta a modo de repositorio de información, y se asignó a un equipo de trabajo ficticio a efectos de disponer de sendas cuentas de correo electrónico y Twitter mediante las cuales añadir información en una posición determinada del tablero. En la primera esta, estas cuentas fueron las utilizadas por los estudiantes desplazados a Perú para enviar la información recolectada al sistema. A lo largo de la segunda de la experiencia, se siguió utilizando como repositorio de esa información y de cualquier otra nueva que cualquier miembro de algún equipo considerase interesante a nivel global, sin perjuicio de que esta también pudiera ser compartida desde su propio espacio de trabajo local.

En la última etapa, los distintos equipos utilizaron el espacio de trabajo compartido para seleccionar las mejores propuestas y recopilar una colección de productos así como un manual de producción adaptado a los procesos tradicionales de fabricación empleados por los artesanos. Estos materiales fueron finalmente editados en formato papel y presentados a los artesanos en Ecuador (Figura 49), los cuales al mismo tiempo fueron instruidos en los distintos nuevos métodos de fabricación y producción.

## **6.- DESARROLLO DE APLICACIONES EDUCATIVAS SOBRE EL MODELO DE ESPACIO COLABORATIVO DISTRIBUIDO**

En este capítulo se presenta el desarrollo de dos aplicaciones específicas sobre la plataforma de modelo de espacio colaborativo distribuido, diseñadas para ser utilizadas principalmente en entornos educativos que empleen metodologías basadas en aprendizaje colaborativo y constructivismo.

La primera aplicación desarrollada permite la construcción de mapas conceptuales, extendiendo su uso al modelo de espacio colaborativo distribuido y aprovechando las características del interfaz natural que ofrece la herramienta.

La segunda aplicación se ha desarrollado como herramienta de fomento de la creatividad en equipos y grupos de trabajo, y se ha evaluado en un contexto educativo mediante una prueba piloto con un conjunto de estudiantes de Ingeniería en diseño Industrial.

### **6.1.- Espacios de aprendizaje colaborativo basados en mapas conceptuales**

Los mapas conceptuales son herramientas gráficas que permiten organizar y representar el conocimiento, las cuales pueden mejorar notablemente la experiencia educativa cuando son utilizadas en escenarios de aprendizaje colaborativo, tal y como se describe en trabajos tales como los de Preszler, R. W. [74] y de Novak J.D. et al. [61]. Ambos trabajos mantienen que trabajar de forma cooperativa en la construcción de mapas conceptuales empleados como herramienta de ayuda para guiar y estructurar los conocimientos, conlleva una notable mejoría en la capacidad de aprendizaje de los estudiantes.

Este tipo de diagramas incluye conceptos, normalmente representados por una caja o un círculo con el texto descriptivo en el interior, y las relaciones que se establecen entre ellos, las cuales se representan mediante líneas orientadas. Sobre las propias líneas de relación se pueden incluir textos explicativos.

La interpretación del mapa conceptual suele realizarse de arriba a abajo y en todo caso siguiendo la orientación de las líneas de interconexión. Dicho de otro modo, la información en un mapa conceptual se organiza de forma jerárquica, donde los conceptos más genéricos se encuentran en la parte superior del mapa (o al principio del mismo), mientras que por debajo van apareciendo conceptos cada vez más específicos, estableciendo un orden de importancia o de inclusividad.

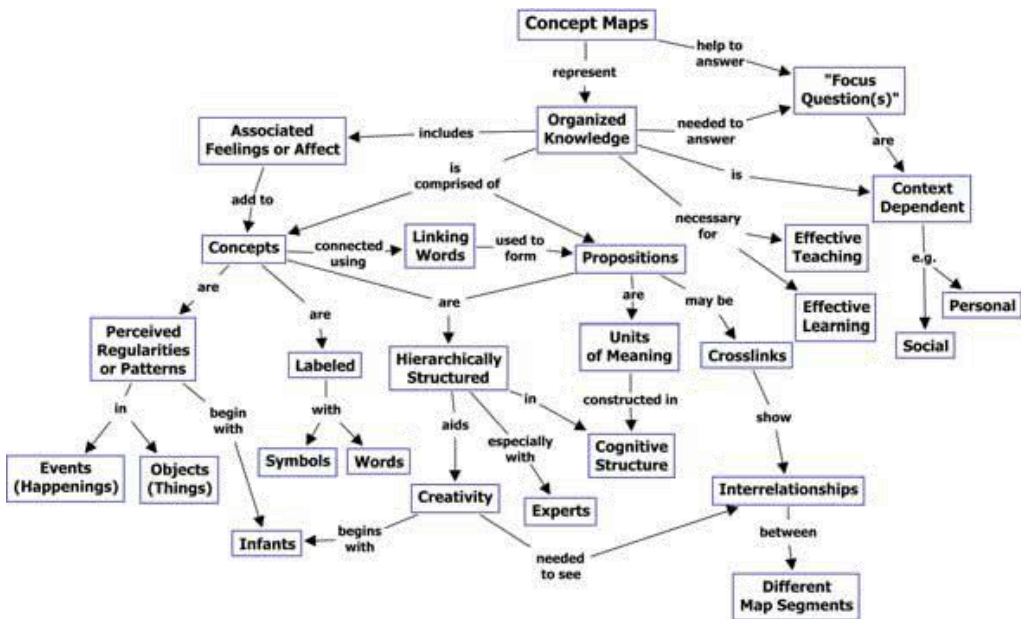


Figura 50: Ejemplo de mapa conceptual [61], el cual a su vez resume las principales características que debe reunir un diagrama de este tipo.

Según Joseph D. Novak<sup>1</sup>, se entiende por concepto una regularidad en los acontecimientos o en los objetos que se designa mediante algún término. Desde la perspectiva del individuo, se puede definir a los conceptos, como imágenes mentales que provocan en nosotros las palabras o signos con los que expresamos regularidades. Las

<sup>1</sup> Joseph Donald Novak (nacido en 1932) es un educador estadounidense, profesor emérito en la Universidad de Cornell e investigador científico senior en el Instituto de Cognición Humana y de Máquinas de Florida (IHMC). Es conocido por su desarrollo de la teoría del mapa conceptual en la década de 1970.

imágenes mentales tienen elementos comunes a todos los individuos y matices personales, es decir, nuestros conceptos no son exactamente iguales, aunque usemos las mismas palabras. Por ello es importante diferenciar entre conceptos e imágenes mentales; estas tienen un carácter sensorial y aquellos abstractos.

De un mapa conceptual se pueden extraer proposiciones, las cuales implican a dos o más conceptos relacionados entre sí, formando un contenido semántico. La Figura 50, muestra un mapa conceptual típico, que en este caso explica precisamente la mecánica de funcionamiento de este tipo de diagramas. De él se pueden extraer proposiciones tales como "Concept Maps - represent - Organized Knowledge - necessary for - Effective Learning".

Los mapas conceptuales se elaboraron por primera vez en 1972 en el transcurso de un programa de investigación de Joseph D. Novak en la Universidad de Cornell <sup>1</sup>. El objetivo de la investigación consistió en analizar la forma de aprendizaje y el grado de entendimiento alcanzado por niños sobre conceptos científicos [63]. En el transcurso de la investigación, los investigadores recopilaban información mediante la realización de entrevistas periódicas a los niños, pero descubrieron que resultaba difícil identificar cambios específicos en la comprensión de conceptos científicos por parte de los estudiantes mediante el análisis de las transcripciones de las entrevistas. De este modo, de la necesidad de hallar una mejor forma de caracterizar la comprensión conceptual de los niños, surgió la idea de representar su conocimiento en forma de un mapa conceptual. Sin embargo, de forma paralela, se descubrió que los mapas conceptuales no solo eran útiles para que los investigadores representaran el conocimiento de los niños, sino que también permitían que los propios niños expresaran su propia comprensión respecto a un dominio del conocimiento. Fruto de estos descubrimientos, el libro "Learning How to Learn" [62], traducido a nueve idiomas, se convirtió en la principal referencia para la creación de mapas conceptuales.

### ***6.1.1.- Implementación de mapas conceptuales sobre el modelo de espacio colaborativo distribuido***

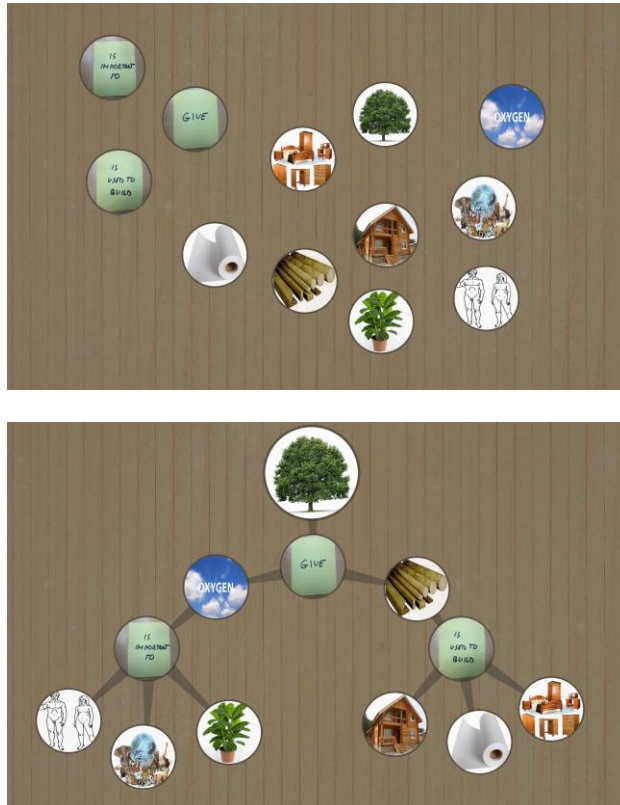
La herramienta desarrollada para la implementación de mapas conceptuales, aprovecha todas las características del modelo de espacio colaborativo distribuido presentado en el Capítulo 4, incluyendo las operaciones básicas de adición, manipulación y gestión de la información, así como las operaciones de control del plano del trabajo (zoom y encuadre). La adición de nueva información también mantiene la filosofía BYOD.

---

<sup>1</sup> La Universidad Cornell es una institución académica de educación superior que pertenece a la prestigiosa Ivy League. Su sede principal está ubicada en Ithaca, Nueva York, y cuenta con sedes alternas en otras localidades como Nueva York, y Doha, Catar. Es considerada una de las mejores universidades, al ubicarse en el ranking del Top 15 de las mejores universidades del mundo.

De igual modo, la aplicación soporta todas las acciones y operaciones asociadas al sistema de manipuladores tangibles desarrollados, cuya descripción y funcionalidad se detalla en el Capítulo 6.

En el caso de la herramienta específica para mapas conceptuales, cada ítem de información agregado al sistema se encapsula en forma de ficha circular, con el objetivo de facilitar el establecimiento de enlaces entre ítems.



*Figura 51: Ejemplo de mapa conceptual [61], el cual a su vez resume las principales características que debe reunir un diagrama de este tipo.*

El establecimiento de las relaciones jerárquicas entre elementos se realiza de modo gestual. Para ello se deben seleccionar simultáneamente los dos objetos a enlazar, desplazando el objeto "hijo" hasta tocar al objeto "padre", que debe permanecer estático. Puesto que casi con toda seguridad también el objeto "padre" sufrirá algún pequeños desplazamiento, el sistema entenderá como tal al que ha sufrido un desplazamiento más corto durante la operación. Tras esta operación, ambos ítems quedan enlazados en forma

---

jerárquica. Tal y como se muestra en la Figura 51, el enlace se representa como una línea orientada, cuyo grosor decrece en dirección al nodo "hijo".

Cualquier operación de desplazamiento del nodo "padre" arrastrará a todos los nodos que jerárquicamente dependen de él. De este modo es posible enlazar todo un árbol a otro ítem siguiendo el mismo mecanismo antes descrito.

De modo similar, para deshacer un enlace, se debe repetir el mismo gesto, solo que en esta ocasión no es necesario diferencia entre nodos "padre" e "hijo". De forma alternativa, manteniendo pulsada por un espacio de tiempo una línea de enlace, el sistema muestra junto a ella un icono con un aspa en su interior, de modo que si se pulsa, el enlace se rompe y desaparece. Las operaciones de "copiar", "cortar" y "pegar" funcionan de forma similar a las descritas en la sección 4.1.2 del Capítulo 4. En este caso tienen propagación jerárquica desde el nodo sobre el que se aplica la operación.

La aplicación soporta información de tipo textual e imágenes, pudiendo ser añadida de cualquier de la formas descritas en la sección 4.3 del Capítulo 4. La rotulación de las relaciones se realiza mediante ítems de información intermedios, tal y como se muestra en la Figura 51. En el ejemplo mostrado en la figura, las relaciones se crearon tomando fotografías directamente sobre notas tomadas a mano.

### ***6.1.2.- Evaluación del sistema***

La evaluación del sistema se desarrolló desde el punto de vista de la usabilidad y grado de satisfacción en los usuarios. El objetivo principal consistió en comprobar si el espacio de trabajo colaborativo distribuido propuesto resultaba adecuado en ambientes de aprendizaje colaborativo, ocultando la complejidad de la tecnología, evitando curvas de aprendizaje e integrándose bien en los entornos de aprendizaje tradicionales.

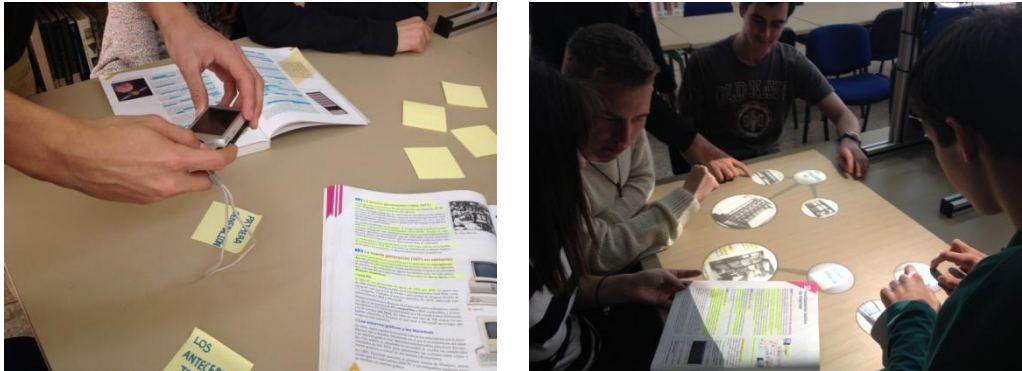
Se realizaron dos experiencias, en las que dos grupos de alumnos, pertenecientes a distintas etapas educativas, hicieron uso de la aplicación para generar mapas conceptuales siguiendo un paradigma constructivista.

En la experiencia se utilizaron dispositivos tabletop del tipo proyectivo, como el empleado en Capítulo 3. Para introducir información al sistema utilizaron sus propios dispositivos, siguiendo la filosofía BYOD propuesta.



### **6.1.2.1. Primera experiencia: evaluación del sistema como herramienta educativa sobre un grupo de alumnos de secundaria**

La primera evaluación de la usabilidad del sistema se llevó a cabo a través de una prueba piloto sobre veinte estudiantes de educación secundaria, organizados en cuatro grupos de cinco estudiantes respectivamente. La experiencia se realizó en dos rondas de diez estudiantes, organizados en dos grupos de cinco alumnos cada vez.



*Figura 52: Alumno tomando imágenes de información real para introducirlos posteriormente en sistema (izquierda). Alumnos trabajando en el modo digital sobre la misma superficie de trabajo (derecha).*

El trabajo de los alumnos consistió en el desarrollo de un mapa conceptual acerca de la evolución histórica de los computadores, desde sus inicios hasta la actualidad. Para ello, los dos grupos de estudiantes, organizados alrededor de dos tabletops, se encargaron de recolectar información acerca de la temática del trabajo, extrayéndola de libros de texto, internet, revistas, etc., y de introducirla al espacio de trabajo digital haciendo uso de sus propios dispositivos (smartphones, tablets, etc.) (Figura 52). Para enviar la información pudieron utilizar, bajo su elección, mensajes de Twitter y correo electrónico. Los estudiantes trabajaron de acuerdo con un escenario de colaboración distribuida, pudiendo compartir información entre los dos grupos mediante operaciones de copiar / pegar.

Mediante la utilización del sistema proyectivo desarrollado, ambos grupos de alumnos pudieron utilizar sus propias mesas de trabajo habituales como espacio de trabajo digital (Figura 52), pudiendo conmutar de uno a otro de una forma muy sencilla. Para la experiencia, se preparó un sencillo mecanismo de conmutación que consistió en la utilización de sendas dos marcas fiduciales de realidad aumentada, una para activar es espacio digital y otra para salir de él (Figura 53). Los alumnos únicamente tenían que colocar sobre la mesa una hoja con la marca impresa para seleccionar la acción deseada.

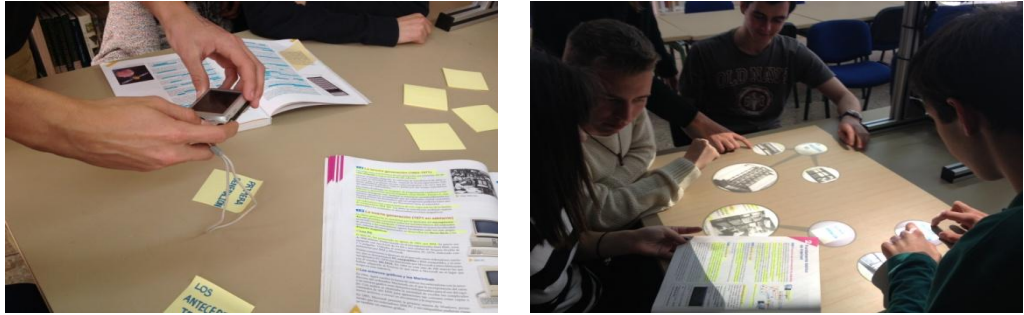


Figura 53: Ejemplo de las hojas con marcas fiduciales de realidad aumentada, para conmutar entre el espacio digital y el real.

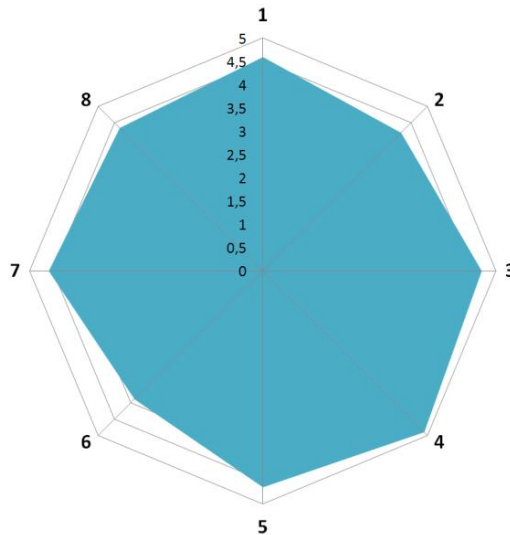
Ningún estudiante tuvo entrenamiento previo con el sistema y en todos los casos era la primera vez que lo utilizaban. Sólo al inicio de la primera sesión, el profesor explicó durante unos cinco minutos el funcionamiento básico. Para evaluar la usabilidad del sistema, se utilizó un cuestionario en escala Likert [52] de 5 valores. La Tabla 20 recoge el cuestionario y los resultados obtenidos. El cuestionario fue rellenado por los alumnos al término de la experiencia.

En opinión de los profesores, el trabajo en equipo se desarrolló de manera satisfactoria, tanto a nivel local entre miembros de un mismo grupo como a nivel colaborativo entre los dos equipos participantes de forma simultánea en cada sesión. Adicionalmente, también en opinión de los propios profesores, los mapas conceptuales obtenidos fueron bastante buenos en los cuatro grupos. Por otra parte, la posterior evaluación de los conocimientos de alumnos reflejó que los conceptos se adquirieron.

Cuestión	x	$\sigma$
1 El uso de la herramienta es sencillo	4,60	0,50
2 Es fácil de comprender el modo de trabajo del sistema	4,20	0,70
3 Aprender el manejo es fácil y sencillo	4,70	0,47
4 Aprender el manejo es rápido	4,90	0,31
5 Resulta sencillo recordar su manejo	4,65	0,49
6 El trabajo en equipo resulta sencillo	3,90	0,64
7 En general, encontré sencillo el manejo del sistema	4,60	0,50
8 En general, el sistema me pareció útil	4,35	0,49

Tabla 20: Ejemplo de mapa conceptual [61], el cual a su vez resume las principales características que debe reunir un diagrama de este tipo.

Los resultados de los test de usabilidad reflejan que pese a no haber recibido entrenamiento previo, el manejo de la herramienta resultó sencillo. Junto con el resto de resultados, la marca obtenida en la cuestión 4, refleja que la curva de aprendizaje resultó muy rápida, lo que sugiere que la herramienta no generó interferencias en el proceso educativo.



*Figura 54: Representación gráfica de los resultados del test de usabilidad.*

La única marca que resulta significativamente más baja, en comparación con el resto, corresponde la cuestión número 6, encargada de evaluar la sencillez del sistema como herramienta de trabajo colaborativo. En conversaciones con los alumnos, trasladaron cierta dificultad a la hora de compartir información entre los distintos grupos. Las operaciones propuestas por la plataforma de "copiado" y "pegado" de la información para tal fin, no les resultaron lo suficientemente cómodas.

En su opinión, el tener que realizar repetidamente operaciones de "zoom" y "encuadre" del plano de trabajo para colocar su marco de dispositivo sobre el espacio de trabajo del otro equipo, con el objetivo de realizar el "copiado" de cierta información, resultaba excesivamente engorroso frente a la opción mucho más natural de desplazarse físicamente al puesto de trabajo del otro grupo. De hecho, en repetidas ocasiones, los alumnos optaban por desplazarse en persona al espacio de trabajo del otro equipo y tomar fotografías directamente sobre la mesa de trabajo de la información que precisaban. Ante esta situación se concluyó que, aunque el modo de trabajo ofrecido por la plataforma sigue resultado de utilizad en espacios de trabajo colaborativo distribuidos en los que los distintos grupos de trabajo se encuentran ubicados en localizaciones remotas, no resulta la

forma más adecuada para el intercambio de información en un espacio de trabajo colaborativo distribuido ubicado en un espacio común. Para resolver esta problemática y mejorar el manejo e intercambio de la información en este tipo de escenarios, se ideó un nuevo mecanismo de interacción natural con el sistema, consistente la utilización de manipuladores tangibles, tal y como se describe en el Capítulo 6.

### 6.1.2.2. Segunda experiencia: evaluación del sistema como herramienta educativa sobre un grupo de estudiantes de Ingeniería en Diseño Industrial

Una segunda evaluación del sistema se llevó a cabo a través de una nueva prueba piloto, esta vez sobre un grupo de diez estudiantes de Ingeniería en Diseño Industrial, organizados en dos grupos de cinco alumnos. Cada grupo empleó nuevamente un sistema tabletop proyectivo como el desarrollado. Las sesiones de trabajo se desarrollaron de forma simultánea con dos equipos instalados en una misma sala.

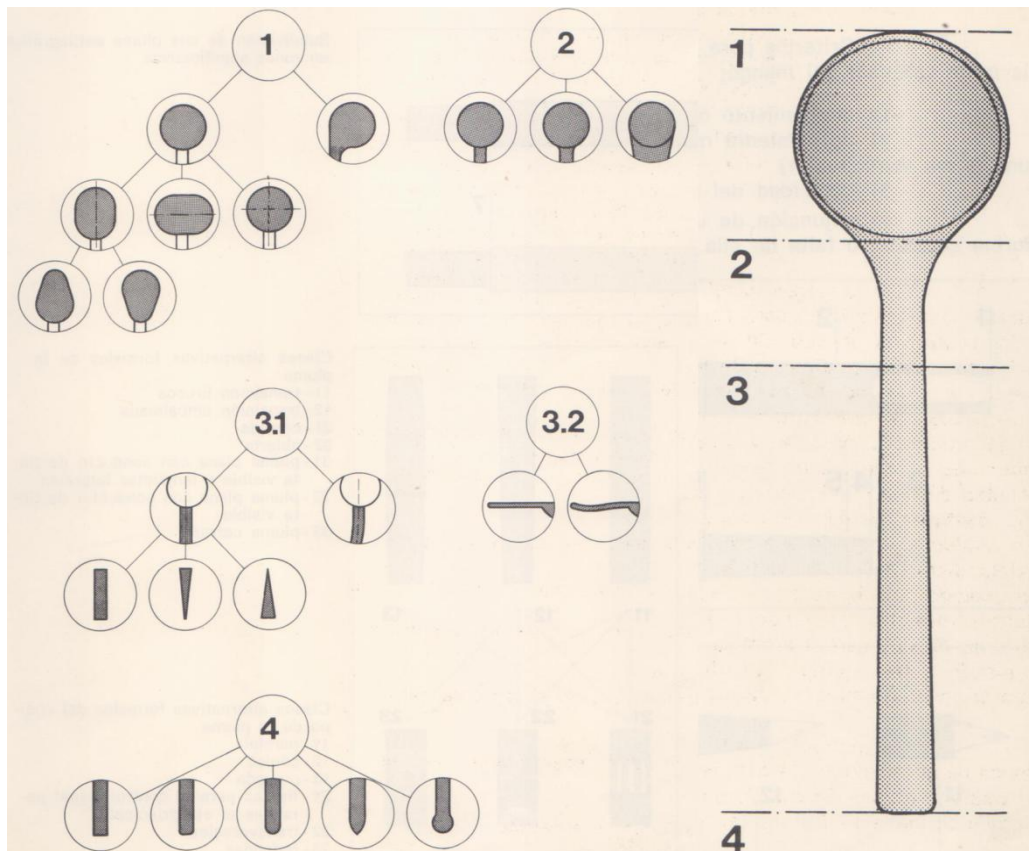


Figura 55: Ejemplo de morfograma extraído de la obra de Gui Bonsieppe [9].

En la experiencia se utilizó la herramienta para desarrollar mapas conceptuales, esta vez adaptada al caso de creación de Diagramas Morfológicos (o Morfogramas). Este tipo de diagramas se pueden representar con una estructura similar a la de un mapa conceptual, en este caso sin nombrar las relaciones (Figura 55).

Un morfograma es un tipo de esquema muy utilizado en las etapas previas de diseño industrial, las correspondientes a etapas más creativas, que permite realizar un análisis de las ideas de objetos de manera comparativa. Esta técnica surge de los análisis taxonómicos con los que los biólogos clasifican las formas naturales, según su relación de similitud, observando las relaciones histórico-evolutivas.

En el mundo del diseño industrial, son diagramas usados en la generación de alternativas formales de las diferentes partes de un objeto con el fin de elegir la configuración más adecuada. Esta técnica consiste en discriminar zonas características en las que ocurren transiciones formales importantes, permitiendo detallar en profundidad cada una de estas secciones.

En esta experiencia piloto, se propuso a los alumnos el diseño de un tenedor, debiendo realizar el análisis morfológico de cada una de sus principales áreas de importancia formales (púas, enlace y eje), sobre la base de algunos de los ejemplos de diseño utilizando diagramas morfológicos de los propuestos en el libro de Gui Bonsieppe [9].

Inicialmente, el profesor describió el ejercicio y proporcionó una primera colección de diferentes bocetos a mano alzada sobre papel de algunos de los elementos morfológicos descriptivos de un tenedor (diferentes bocetos para cada grupo).

Por su parte, cada grupo se encargó de introducir estos bocetos en sus respectivos espacios de trabajo, utilizando sus propios smartphones. Adicionalmente, tuvieron que enriquecer la colección de bocetos con sus nuevas propuestas, o bien utilizar imágenes de partes de objetos reales. De igual modo, en muchos casos los alumnos añadieron información tipo texto, a modo de notas de aclaración sobre el plano de trabajo.

En la experiencia, ambos grupos de trabajo se encontraban en la misma habitación, pero se les instó a simular un escenario en el que cada grupo estuviera en una ubicación remota, de modo que únicamente se podían comunicar por medios electrónicos (EMail, videoconferencia, etc.) e intercambiar información a través del propio plano de trabajo.

Durante una primera fase, cada grupo trabajó por separado, aportando sus propios bocetos y las posibles soluciones a los objetos (Figura 56). En una segunda fase, ambos equipos dialogaron entre ellos y compartieron ideas y propuestas de diseño, visitando "virtualmente" el área de trabajo del otro equipo.

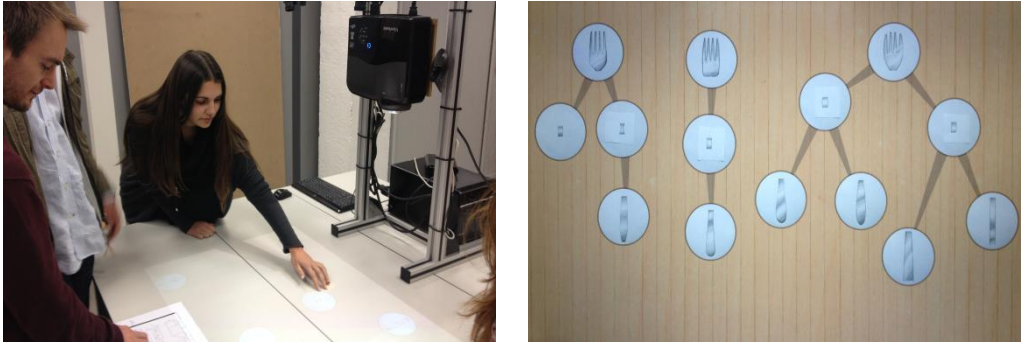


Figura 56: Ejemplo de objeto manipulable (izquierda). Prototipo de Interfaz de Usuario manipulable (derecha).

Finalmente, ambos equipos generaron una solución conjunta compuesta por diez alternativas de diseño del objeto propuesto, siguiendo unas pautas que el propio profesor iba marcando. Para ello, en esta última fase, ambos equipos trabajaron en forma conjunta sobre un área común del plano de trabajo, sobre la que cada equipo previamente desplazó sus respectivas propuestas de soluciones parciales.

Igual que en el caso de la experiencia anterior, se evaluó la usabilidad del sistema mediante un cuestionario en escala Likert de 5 valores. La Tabla 21 recoge los resultados obtenidos.

Cuestión	x	$\sigma$
1 El uso de la herramienta es sencillo	4,70	0,48
2 Es fácil de comprender el modo de trabajo del sistema	4,30	0,67
3 Aprender el manejo es fácil y sencillo	4,60	0,52
4 Aprender el manejo es rápido	4,80	0,42
5 Resulta sencillo recordar su manejo	4,50	0,53
6 El trabajo en equipo resulta sencillo	3,90	0,57
7 En general, encontré sencillo el manejo del sistema	4,70	0,48
8 En general, el sistema me pareció útil	4,50	0,53

Tabla 21: Resultados del test de usabilidad.

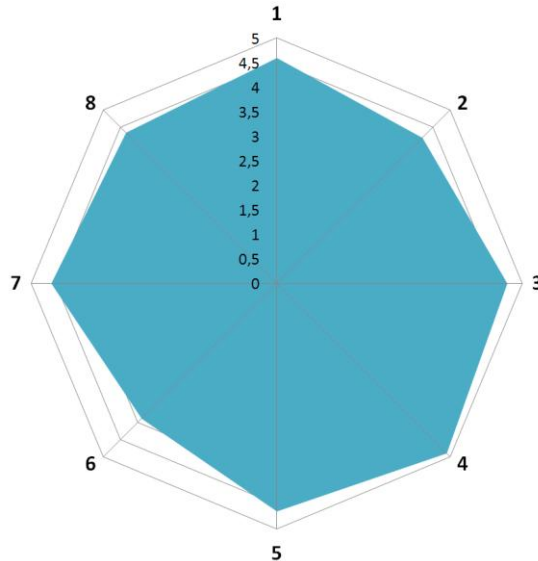


Figura 57: Representación gráfica de los resultados del test de usabilidad.

Los resultados de usabilidad arrojados resultan muy parecidos a los obtenidos en la primera prueba piloto. Resulta destacable que nuevamente la peor evaluación se da para la cuestión 6. Tras una serie de entrevistas con los alumnos, se identificaron las mismas problemas que en el caso de la experiencia anterior, aunque cabe destacar que en esta ocasión se simuló un espacio colaborativo distribuido en el que ambos equipos únicamente podían comunicarse mediante medios electrónicos y sobre el propio plano de trabajo compartido (no se podían desplazar físicamente al lugar de trabajo del otro equipo). Por este motivo, en el desarrollo de elementos manipuladores tangible presentado en el Capítulo 6, se tiene en cuenta esta circunstancia, adaptando la funcionalidad de los manipuladores tangibles también a escenarios de este tipo.

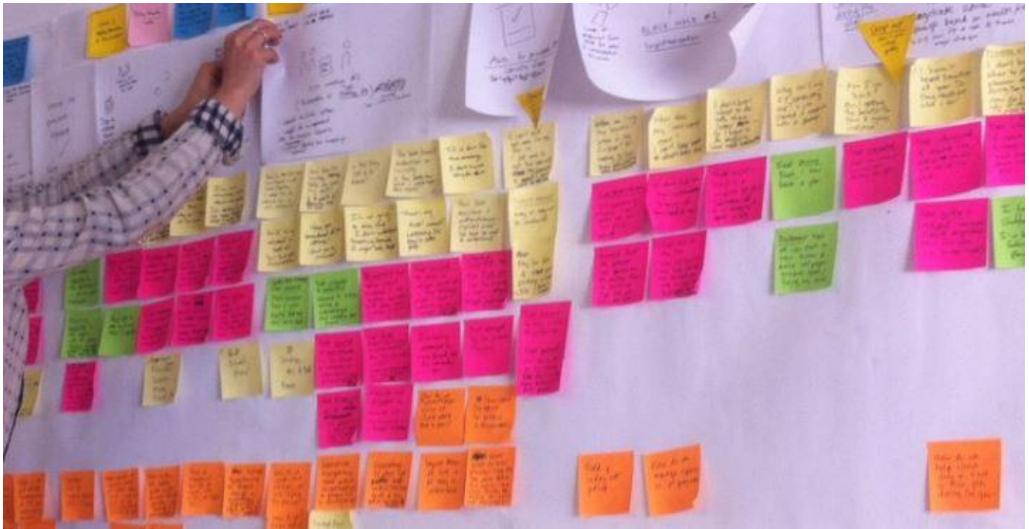
## 6.2. Herramienta de fomento de la creatividad

Las técnicas creativas, especialmente aquellas basadas en métodos intuitivos, juegan un papel fundamental en los estudios de Diseño Industrial. Por lo general, implican técnicas de trabajo en grupo que facilitan la generación de nuevas ideas sobre un determinado tema o problema.

Algunos de los métodos clásicos de creatividad son bien conocidos, tales como: tormentas de ideas, mapas mentales, SCAMPER, etc. En muchos casos, los participantes

se reúnen alrededor de un gran espacio de trabajo común sobre el que se generan ideas y se organiza la información y fomentar el desarrollo la creatividad.

En general, la mayoría de los métodos de creatividad se basan en la generación y manipulación de elementos de información simples (principalmente imágenes y texto), dispuestos sobre grandes espacios físicos comunes, tales como pizarras o tableros de corcho (Figura 58). Esta característica permite que los participantes se centren exclusivamente en el propio método de creatividad, evitando tareas complejas de gestión de la información (que puede distraer a los diseñadores e interferir con el proceso creativo).



*Figura 58: Ejemplo de información y tipo de estructuras generadas habitualmente en las sesiones de creatividad.*

Sin embargo, aunque estos elementos básicos de información son fáciles de generar y utilizar, resultan difíciles de transferir y almacenar en su totalidad, sin perder la estructura generada sobre la superficie de trabajo.

De este modo, a menudo resulta difícil usar estos elementos (y sus conexiones con otros elementos) fuera del espacio físico en el que la sesión creativa tuvo lugar, y como resultado, toda la información generada durante las sesiones debe mantenerse en el mismo espacio físico donde se creó. Esto implica que las sesiones de creatividad no puedan desarrollarse en otro lugar. Como consecuencia, cuando el proceso creativo se extiende por varias sesiones, los participantes pierden la capacidad la inmediatez de aportación de nuevas ideas (quizá la mejor idea se le ocurrió a algún participante en el trayecto de vuelta a casa y luego la olvidó...). Adicionalmente, otro efecto negativo tiene que ver con que el



gran espacio ocupada para depositar la información de las sesiones de creatividad, no puede ser reutilizado para otros menesteres hasta que termina el proceso.

En el contexto del diseño, la tecnología puede desempeñar un papel importante si mantiene los elementos de simplicidad de los entornos tradicionales y el proceso creativo no se ve afectado negativamente. Particularmente, los espacios basados en realidad mezclada, pueden resultar muy adecuados en este tipo de desempeños, desde el punto de vista de la ocultación de la complejidad de la tecnología y de la facilidad de transmisión de información entre mundo real y virtual, que resulta un mecanismo natural. La Figura 59, muestra un ejemplo de este tipo de espacios generado con la herramienta presentada en esta sección.



*Figura 59: Ejemplo de espacio de realidad mezclada mediante la utilización del sistema desarrollado.*

En esta sección, se propone y evalúa como herramienta educativa un modelo de espacio digital destinado al desarrollo de técnicas de creatividad, basado en el concepto de espacios de realidad mezclada y desarrollado sobre la plataforma de generación de espacios de trabajo colaborativo distribuidos presentada en el Capítulo 3. Sobre dicha plataforma se ha desarrollado un conjunto de herramientas específicas que implementan distintas técnicas de creatividad. A este conjunto se le ha denominado como la "Máquina de Ideas".

El sistema está ideado principalmente para ser utilizado en contextos educativos basados en trabajo colaborativo, donde el fomento de la creatividad juegue un papel fundamental. Particularmente la herramienta se ha testado sobre estudiantes de Ingeniería en Diseño Industrial, en el contexto de asignaturas relacionadas con la creatividad. El

---

sistema es capaz de sugerir a los usuarios nuevas ideas y vías de investigación, mediante la aplicación de diversas metodologías de creatividad, bajo un punto de partida inicial generado por el propio profesor o instructor..

### **6.2.1. Antecedentes**

Algunos trabajos [44] han explorado las implicaciones que tienen los entornos de trabajo colaborativo digitales en el desarrollo y fomento de la creatividad en los procesos de diseño, relacionándolo con las relaciones sociales que se establecen entre los miembros del grupo de trabajo y que incrementan el grado de motivación en el equipo. Adicionalmente el trabajo propone un método de codificación mediante un análisis cuantitativo y cualitativo de las aportaciones generadas por los participantes.

Otros estudios [31] analizan las características que deben presentar los entornos digitales de trabajo colaborativo destinados a potenciar la creatividad de los participantes. Para ello proponen una serie de consideraciones de diseño. En resumen, de un estudio sobre 30 participantes, extraen como principales conclusiones que el sistema debe resultar lo suficientemente sencillo en su manejo como para no interferir en los procesos creativos, debe ofrecer un interfaz que asemeje las acciones que habitualmente se realizan en un espacio de trabajo colaborativo real y deben potenciar las relaciones entre los usuarios permitiendo una comunicación en la forma cara-a-cara. En este sentido, el modelo de espacio de espacio colaborativo distribuido presentado en el Capítulo 4, cumple con todos estos requisitos y por lo tanto resulta adecuado para desarrollar sobre él las aplicaciones de creatividad.

Un ejemplo de implementación se encuentra en el trabajo presentado por E. Tse et Al. [99], en el que los autores presentan una aplicación que implementa el método KJ de creatividad y que se ejecuta sobre un sistema tabletop.

Desde otro punto de vista, en entornos de aprendizaje colaborativo, en un interesante trabajo de R. Martínez-Maldonado et Al. [55], los investigadores proponen la generación automática de indicadores de participación de los equipos, que puede ser útil durante las evaluaciones de los estudiantes. En la misma línea de investigación, en [56] se proponen la utilización de técnicas de "Data Mining" en la extracción y caracterización de los grandes flujos de información que se dan en un entorno educativo.

### **6.2.2. La "Máquina de Ideas"**

La Máquina Ideas es un espacio de trabajo colaborativo distribuido, inspirado en las teorías de los espacios de realidad mezclada y computación ubicua, que implementa una

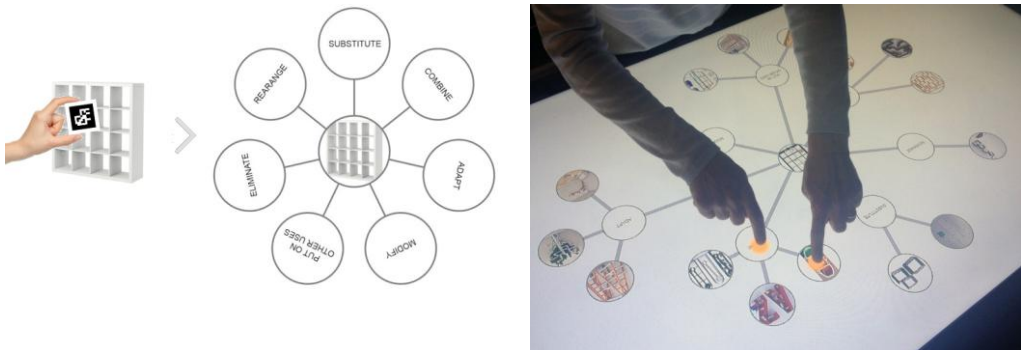
herramienta de creatividad destinada principalmente para los procesos educativos de Diseño Industrial. Su implementación se sustenta sobre el espacio de trabajo colaborativo distribuido presentado en el Capítulo 4.

El sistema proporciona distintas aplicaciones y mecanismos que pueden ser empleados en el desarrollo de distintos escenarios de orquestación de aula, con el objetivo de estimular la creatividad en los estudiantes.

Con el objetivo de ofrecer un interfaz más natural, las aplicaciones de creatividad utilizan un modelo de interacción con el sistema basado en manipuladores tangibles y que se describen en el Capítulo 6.

### **6.2.2.1. SCAMPER**

La primera herramienta desarrollada se basa en el bien conocido método de creatividad SCAMPER [97]. Se trata de una técnica desarrollada por Bob Eberlse, que está basada en la formulación de cuestiones acerca de productos ya existentes de una manera sistemática. SCAMPER es el acrónimo en inglés de los siete tipos de preguntas principales que deben ser formuladas acerca de un objeto: Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put to other uses, Eliminate, and Rearrange. A su vez, estas siete cuestiones obligatorias, pueden dar lugar a la formulación de otras nuevas.



*Figura 60:* Estructura SCAMPER generada automáticamente tras colocar el manipulador tangible asociado a la operación sobre una imagen del plano de trabajo (izquierda). Ejemplo de la extensión de la estructura original mediante la adición de nuevos ítems (derecha).

Para iniciar la herramienta SCAMPER, se debe colocar un manipulador tangible asociado con la herramienta, sobre un ítem de imagen o texto previamente añadido al plano de trabajo virtual, el cual actuará como elemento raíz (Figura 60). En ese momento

---

se generará automáticamente una estructura jerárquica dependiente del elemento raíz. De este modo, alrededor del elemento raíz se distribuirán de forma automática otros siete, correspondiente a las siete cuestiones básicas que exige el método.

Una vez que la estructura principal está generada, se puede retirar la marca. A partir de ese momento la estructura se puede manipular del mismo modo que cualquier otro elemento dispuesto sobre el plano virtual de trabajo. Cualquier otro ítem estándar de información puede ser enlazado a cualquiera de los elementos que definen las cuestiones principales del método, de la misma forma a como se realiza en el caso de los mapas conceptuales (ídem para la operación de desenlazado). Cualquier ítem de información genérica tomará forma de ficha circular una vez enlazado a alguno de los elementos de la estructura. A su vez, a un ítem enlazado se le pueden enlazar otros, extendiendo la estructura.

Cabe destacar, que la utilidad, además de ser compatible con todas las operaciones básicas de modelo de espacio colaborativo distribuido, también lo es con todas las operaciones asociadas a manipuladores tangibles y que se describen en el Capítulo 6.

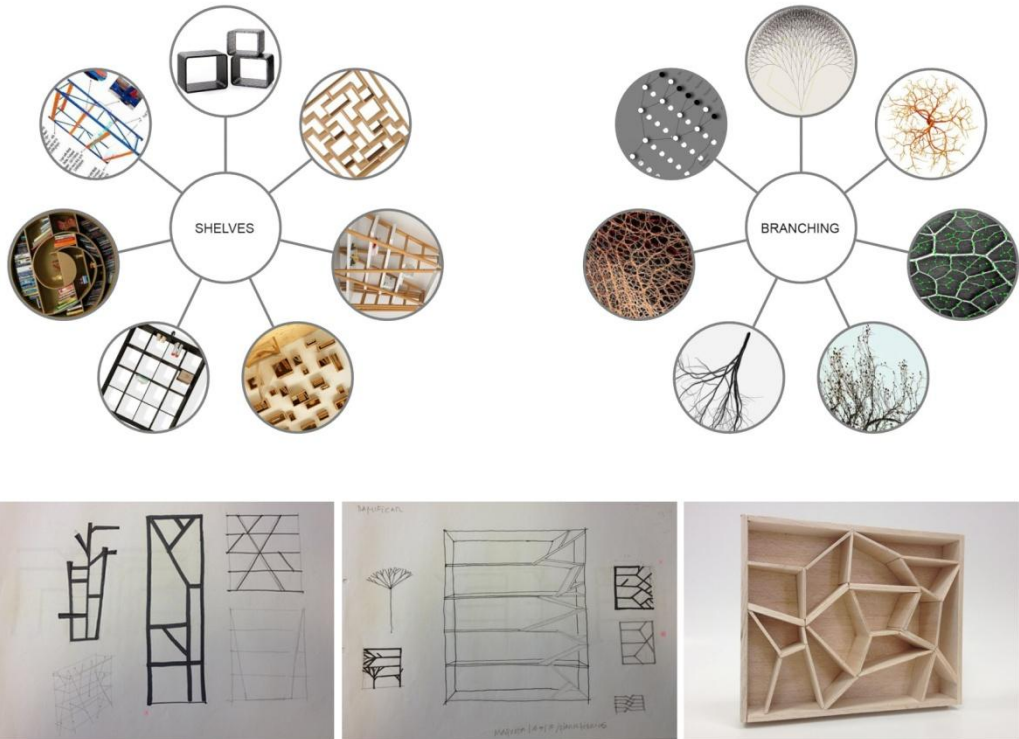
### **6.2.2.2. Generador aleatorio de ideas**

La segunda aplicación desarrollada corresponde a un "generador aleatorio de ideas". El propósito de esta herramienta es la de actuar como una fuente de ideas, sugiriendo imágenes aleatorias relacionadas con un concepto particular.

Mediante un sencillo fichero de configuración, el administrador del sistema puede asociar carpetas de archivos con manipuladores tangibles (a través de sus IDs). Estas carpetas están compartidas a través de la red local (o redes VPN, en configuraciones remotas) o bien pertenecer a algún servicio de almacenamiento en la nube (tipo Dropbox o similar). En cualquier caso, los usuarios (principalmente el profesor) tienen acceso a estas carpetas y pueden depositar información (archivos de imagen y texto) de un modo convencional. Cada carpeta debe contener información relacionada en torno a un temática, tipo de objeto, etc. El tipo de información se puede rotular mediante un sencillo archivo de texto que debe llamar obligatoriamente "contents.txt" (uno por carpeta). El contenido del archivo sirve para rotular a efectos identificativos el tipo de información que contiene la carpeta. En el ejemplo de la Figura 61, se estarían utilizando dos carpetas compartidas. En la primera se almacenaría una colección de imágenes de estanterías y el archivo "contents.txt" contendría simplemente la palabra "SHELVES". Por su parte, la segunda carpeta almacenaría imágenes relativas al concepto de "ramificación", y en este caso el archivo de texto contendría la palabra "BRANCHING".

El objetivo de estas carpetas es albergar una colección, suficientemente extensa, de imágenes y textos relativos a una determinada temática. El responsable de su

mantenimiento será principalmente el profesor o su caso el responsable de la sesión de creatividad.



*Figura 61: Generación de imágenes aleatorias a partir del concepto de "estanterías" (superior, izquierda) y "ramificación" (superior, derecha), y resultados generados por los estudiantes (bocetos y modelos) combinando las dos ideas (debajo).*

Definida esta información de partida, el funcionamiento de la aplicación es muy sencillo. Basta con colocar un manipulador tangible asociado con determinada carpeta sobre el tabletop, y se desplegará automáticamente una estructura con un elemento central en el que el sistema escribe el contenido del archivo "context.txt" de la carpeta, y a su alrededor un número (configurable) de elementos correspondientes a un subconjunto aleatorio de imágenes o textos extraídos de la carpeta en cuestión.

La estructura se mantiene mientras el manipulador tangible está dispuesto sobre el tabletop. Un movimiento de rotación hacia izquierda o derecha provoca la actualización aleatoria de los ítems desplegados alrededor del elemento central.

Estos ítems se pueden desligar del elemento central, pasando a comportarse como un elemento estándar sobre el tablero del trabajo. Sin embargo no son eliminados de su

---

carpeta base, por lo que pueden volver a surgir aleatoriamente al volver a colocar el manipulador tangible sobre la superficie del tabletop.

### **6.2.2.3 Extracción automática de métricas de uso**

Con el objetivo de proporcionar información a los instructores para la evaluación la participación tanto a nivel grupal como individual de los estudiantes, el sistema almacena automáticamente todos los eventos y la interacciones que se producen durante una sesión creativa: tipo de evento, instante en que se produce, el estudiante que lo generó (si es posible), etc. Esta información se puede exportar a una hoja de cálculo para su análisis.

Esta funcionalidad permite a los instructores obtener una amplia y actualizada información actualizada de los estudiantes, que no se podrían obtener de otra manera en un entorno de colaboración tradicional debido a las limitaciones técnicas y de tiempo.

A modo de ejemplo, el sistema registra cada evento de toque con el dedo que se produce sobre la mesa. Aunque no es posible identificar al usuario específico que realiza la acción, si que es posible identificar al grupo (a través del dispositivo tabletop que generó el evento), y en cualquier caso extraer información útil sobre las tasas de uso y periodos de actividad.

Del mismo modo, cuando un nuevo elemento se agrega al sistema, se registran datos acerca del tipo de información (texto, imagen o 3D), nombre del archivo, instante en que se añadió el objeto y el método utilizado. Si el elemento fue enviado por correo electrónico o un mensaje de Twitter, la identidad del remitente también se almacena.

Finally, we implemented a number of metrics based on the interaction events described previously to determine the degree of success of every element that is added to the system. For example, for a specific image, the application records the number of times that it is selected, moved, linked to a SCAMPER diagram, etc. These indicators are used as an index of success for that particular image, which can help instructors evaluate successful contributions.

Por último, se han implementado una serie de métricas basadas en los eventos de interacción descritos anteriormente, para determinar el grado de éxito de cada elemento que se añade al sistema. Por ejemplo, para una imagen específica, la aplicación registra el número de veces que se ha seleccionado, trasladado, vinculado a un diagrama de SCAMPER, etc. Estos indicadores se utilizan como un índice de éxito o de actividad para esa imagen en particular, lo que puede ayudar a los instructores a evaluar el éxito de cada contribución.

### 6.2.3. Evaluación del sistema

La evaluación del sistema se desarrolló desde los parámetros eficiencia y usabilidad. Para evaluar la eficiencia se usó un diseño cuasi experimental, basado en un grupo de control mediante un diseño de tipo Pre test / Post test (Tabla 22).

	Observaciones (O) y utilización del nuevo sistema (X)		
Cohorte 1 Grupo A	O <sub>11</sub>	X	O <sub>12</sub>
Cohorte 2 Grupo B	O <sub>21</sub>		O <sub>22</sub>

Tabla 22: Esquema del diseño cuasi experimental basado en grupo de control y un esquema Pre test / Post Test.

El estudio se realizó sobre un grupo de 25 estudiantes de Ingeniería Técnica en Diseño Industrial, durante una asignatura de diseño de producto organizada dos semestres. Dicha asignatura está basada en desarrollo de proyectos; los estudiantes son evaluados en base a la realización de dos proyectos (uno por semestre). Los proyectos son similares en complejidad, variando únicamente el tipo de producto a diseñar. En el estudio, el proyecto de primer semestre consistió en el diseño de un juguete, mientras que correspondiente al segundo semestre estaba relacionado con el diseño de mobiliario, específicamente estanterías.

Los estudiantes se dividieron en dos grupos: "grupo A" y "grupo B". Durante el primer semestre, ambos grupos realizaron el proyecto de la forma tradicional. Durante el segundo semestre, los estudiantes de "grupo A" utilizaron la nueva herramienta, mientras que el "grupo B" continuó con una metodologías tradicional igual que la del primer semestre.

Los resultados del estudio se muestran en la Figura 62. Los gráficos representa las calificaciones obtenidos por los estudiantes en el primer semestre en comparación con las obtenidas en el segundo semestre (cada punto representa un estudiante). La línea de regresión para el grupo B está más cerca de 45 grados y su extensión prácticamente intersecaría el origen, lo que sugiere que las puntuaciones son similares para primer y segundo semestre. Por otra parte, la pendiente de la línea de regresión para el grupo A no es tan pronunciada, lo que sugiere que, en promedio, las puntuaciones son más altos en el segundo semestre.

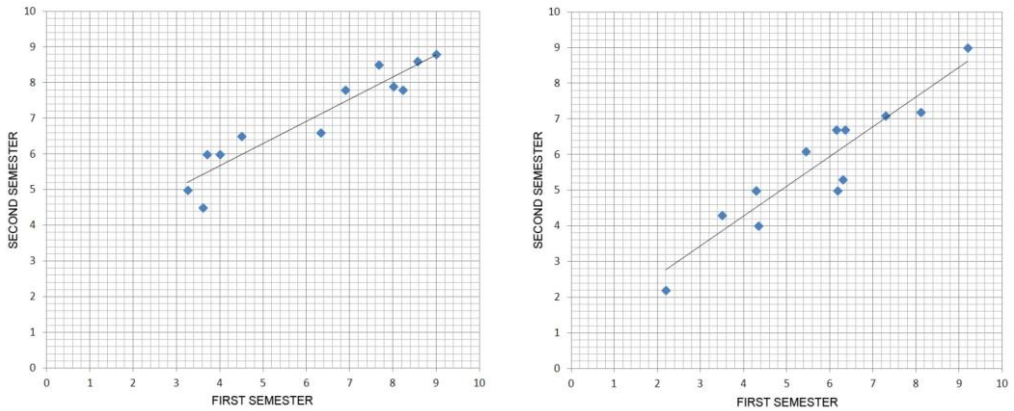


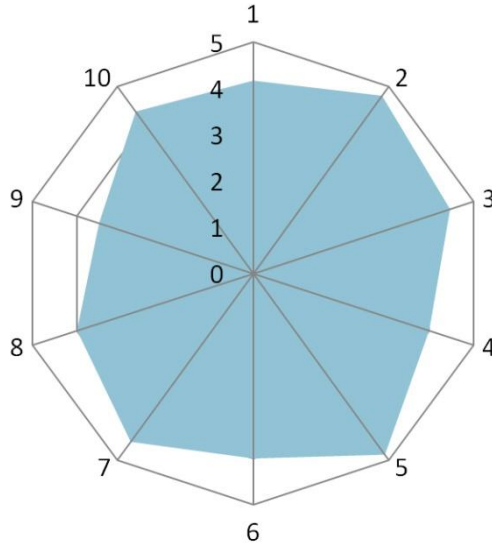
Figura 62: Diagrama de dispersión y recta de regresión para los grupos A (izquierda) y B (derecha). Las calificaciones están representadas en una escala sobre 10.

Al igual que en casos anteriores, para evaluar la usabilidad y el grado de satisfacción de los estudiantes, se utilizó un cuestionario con una escala Likert de cinco niveles [17]. Las cuestiones Q1-Q5 evalúan la usabilidad, mientras que las cuestiones Q6-Q10 evalúan la satisfacción.

Cuestión	x
1 <i>El uso de "La Máquina de Ideas" es sencillo.</i>	4,10
2 <i>He aprendido a utilizar el sistema rápidamente y no he precisado entrenamiento previo.</i>	4,80
3 <i>No encontré problemas con el sistema a lo largo de las sesiones de creatividad.</i>	4,60
4 <i>Los métodos para añadir nueva información a la "Máquina de Ideas" son suficientemente intuitivos.</i>	4,00
5 <i>La "Máquina de Ideas" no interfirió con mi proceso creativo.</i>	4,90
6 <i>Prefiero las sesiones de creatividad en las que se utiliza la "Máquina de Ideas" a las sesiones tradicionales</i>	4,00
7 <i>La "Máquina de Ideas" contribuyó de manera satisfactoria al proceso de creatividad.</i>	4,50
8 <i>Valoro la oportunidad de enviar elementos de información con nuevas ideas cuando se me ocurren, incluso fuera del período de tiempo reservado para sesiones de creatividad.</i>	4,00
9 <i>Valoro la oportunidad de enviar elementos de información acerca de las nuevas ideas de forma anónima (excepto para el instructor).</i>	3,50
10 <i>Me gustaría trabajar con la "Máquina de Ideas en futuros proyectos"</i>	4,20

Tabla 23: Cuestionario y resultados del test de usabilidad / satisfacción.





*Figura 63: Representación gráfica de los resultados del test de usabilidad / satisfacción.*

Aunque los estudiantes no recibieron entrenamiento previo en el manejo de la herramienta y se trataba de la primera vez que la utilizaban, encontraron el sistema sencillo y fácil de utilizar, como lo demuestran sus respuestas a las primeras cinco preguntas relacionadas con la facilidad de uso (Figura 63). De acuerdo con sus respuestas a las preguntas 6 a 10, los estudiantes mostraron estar satisfechos con el sistema y agradecieron la oportunidad de publicar nuevas ideas tan pronto como se les ocurrían, incluso fuera de las sesiones de creatividad, sacando provecho de la inmediatez. De igual modo, estudiantes también valoran la oportunidad de expresar sus ideas de forma anónima (tal como sospechaban los profesores).

#### **6.2.4. Conclusiones**

Se ha desarrollado un sistema que implementa un espacio de trabajo colaborativo distribuido bajo el concepto de espacios de realidad mezclada y computación ubicua, que representa una herramienta de apoyo e incentivo al proceso creativo en el contexto de los estudios de Ingeniería Técnica en Diseño Industrial.

El sistema fue testado en una primera prueba piloto en el transcurso de un año académico con un grupo de estudiantes de I.T en Diseño Industrial. Los resultados

muestran que el sistema supone una herramienta útil de apoyo a la creatividad, capaz de mejorar las calificaciones de los estudiantes, y de promover el grado de compromiso y participación de los estudiantes.

Del análisis del número y calidad de los ítems de información proporcionados por los estudiantes durante las sesiones de creatividad, se comprobó que en líneas generales el grupo de estudiantes que utilizó el nuevo sistema contribuyó significativamente con más información que el grupo que no lo utilizó. Curiosamente, el análisis también reveló que el número de contribuciones durante las sesiones de creatividad fue similar en ambos grupos. Sin embargo, los estudiantes que utilizaron el nuevo sistema generaron un mayor volumen de información fuera de los períodos de tiempo dedicados a sesiones de creatividad. Estos estudiantes enviaron a menudo información vía correo electrónico y Twitter, aprovechando de este modo los momentos espontáneos de inspiración.

Basándose en los resultados obtenidos en la prueba de usabilidad, la herramienta resultó lo suficientemente transparente y fácil de usar como para evitar interferir en el proceso creativo. En cuanto a la satisfacción del usuario, los estudiantes estuvieron de acuerdo en que el sistema representa una herramienta valiosa para promover la creatividad.

Este resultado confirma que herramientas como la desarrollada, basadas en interfaces naturales que ocultan la complejidad de la tecnología y basadas en espacios de realidad mezclada, tienen un impacto positivo en los procesos creativos.



## **7.- INCORPORACION DE INTERACCION MEDIANTE ELEMENTOS TANGIBLES FISICOS AL MODELO DE ESPACIO COLABORATIVO DISTRIBUIDO**

La utilización de interfaces tangibles basados en la interacción con el sistema mediante la manipulación de objetos físicos representa un aspecto importante en el desarrollo de Interfaces Naturales, puesto que ofrecen un modo de interacción con la tecnología basado en metáforas de uso de herramientas y utensilios que empleamos habitualmente en las tareas cotidianas de nuestro entorno físico real. Las interfaces de usuario tangibles han sido ampliamente utilizados como mecanismos de interacción con la información digital de forma física, cuyos beneficios en tareas de trabajo y aprendizaje colaborativo se analizan y describen bien en diversos trabajos de investigación [21, 35, 36, 107].

La incorporación de elementos físicos tangibles al modelo de espacio de trabajo y aprendizaje colaborativo diseñado, permite aumentar las posibilidades de interacción con la información dispuesta sobre el plano de trabajo, principalmente cuando esta manipulación se da entre distintos dispositivos pertenecientes a diferentes grupos de trabajo, extendiendo las ventajas de utilización de este tipo de manipuladores al modelo de espacio de colaboración distribuido.

En este capítulo se presenta el desarrollo de un novedoso sistema de implementación de manipuladores tangibles físicos, diseñados para ser utilizados sobre sistemas tabletop basados en la utilización de marcos ópticos. El principal aporte consiste en haber conseguido desarrollar un tipo de manipuladores totalmente pasivos (no requieren de fuente de alimentación ni de elementos adicionales), de los que se puede extraer en tiempo real su identificador, posición y orientación sobre el plano de trabajo definido por la superficie del tabletop. Adicionalmente y con el objetivo de ampliar las posibilidades del sistema, también se incorpora al modelo la opción de utilización de manipuladores tangibles basados en marcas fiduciales. De este modo amplían las posibilidades de orquestación de espacios de trabajo distribuidos mediante la utilización de sistemas tabletop de tipo proyectivo, como el presentado en el Capítulo 3.

## **7.1. Desarrollo de manipuladores tangibles pasivos para dispositivos Tabletop implementados mediante tecnología basada en marcos ópticos**

Los sistemas tabletop se caracterizan por ofrecer una gran superficie interactiva sobre la que varios usuarios pueden interactuar con ella mediante gestos con sus propias manos y eventualmente mediante la utilización de elementos físicos tangibles. Desde la aparición de los primeros dispositivos hasta la fecha, se han venido utilizando diferentes tipos de soluciones y tecnología en sus implementaciones [60, 90].

### ***7.1.1. Implementación de dispositivos tabletops mediante la utilización de marcos ópticos infrarrojos***

La utilización de marcos ópticos infrarrojos [6] ofrece una opción muy interesante en la implementación de dispositivos tabletop. Este tipo de dispositivos permiten convertir cualquier pantalla plana, ya sea proyectada/retroproyectada o de cristal líquido (LCD) dispuesta horizontalmente, en un dispositivo multitáctil de tipo tabletop. Para ello simplemente es necesario adherir el marco sobre la pantalla o la superficie de proyección. Habitualmente el propio marco incorpora toda la electrónica y dispone de un conector USB con el que se puede conectar directamente a un ordenador.



*Figura 64: Ejemplo de marcos ópticos multitáctiles, basados en tecnología de luz infrarroja.*

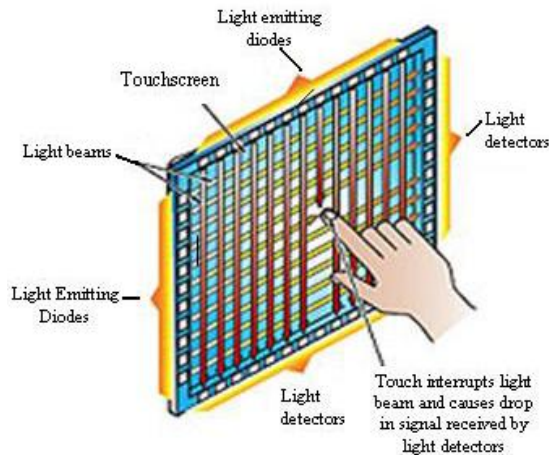
En la actualidad, este tipo de marcos ópticos han reducido sus precios de una forma muy significativa, pudiéndose encontrar en los formatos y mediadas más habituales de monitores y pantallas planas de televisión (incluso en formatos extremadamente grandes), alcanzando altas resoluciones en la detección de las pulsaciones, gran número de pulsaciones simultáneas y altas velocidades de refresco ( $\geq 200\text{Hz}$ ). Utilizando pantallas

de alta resolución, se puede implementar un dispositivo tabletop de altas prestaciones, con una excelente calidad de imagen.



*Figura 65: Ejemplo de dispositivo tabletop utilizado en la investigación, implementado mediante un marco óptico infrarrojo y una pantalla plana de televisión.*

Una pantalla táctil de infrarrojos utiliza una matriz de LED de infrarrojos XY y pares de fotodetectores alrededor de los bordes, encargados de detectar interrupciones en el patrón de los haz de luz (Figura 66). Una ventaja importante de este sistema es que puede detectar esencialmente cualquier entrada, desde los propios dedos de los usuarios hasta cualquier otro objeto (lápiz, bloque, etc.) que interrumpa el patrón de luz infrarroja.



*Figura 66: Detalle de la tecnología de un marco óptico infrarrojo [6].*

### **7.1.2. Manipuladores tangibles sobre marcos ópticos**

En general, para cada manipulador tangible en un sistema, es necesario mantener un identificador único (ID) y realizar un seguimiento de su posición y orientación sobre la superficie de la mesa interactiva.

Por ejemplo, en los sistemas tabletop basados en retroproyección, una cámara situada debajo de la superficie puede reconocer marcas predefinidas que están impresas en las caras inferiores de los elementos tangibles. Estas marcas identificativas son visibles desde la posición de la cámara a través de la superficie translúcida [42, 68], posibilitando el cálculo de su posición y orientación sobre el tablero, además de su identificador.

Otras implementaciones hacen uso de sistemas de radiofrecuencia. En este caso, cada objeto tangible incorpora una tarjeta RFID, la cual a su vez incorpora un circuito LC que resuena a una determinada frecuencia, identificándolo. La posición del manipulador sobre la mesa se determina mediante triangulación a partir de los valores de resonancia generados por el módulo RFID sobre distintas antenas dispuestas alrededor del dispositivo tabletop. El problema con estos sistemas es que únicamente son capaces de retornar la posición XY del dispositivo sobre el tablero, pero no su orientación (a menos que se utilice más de una tarjeta RFID por cada manipulador [32], lo cual es muy limitante). Por otra parte se requiere un hardware adicional, lo cual incrementa los costes de la solución tabletop final.

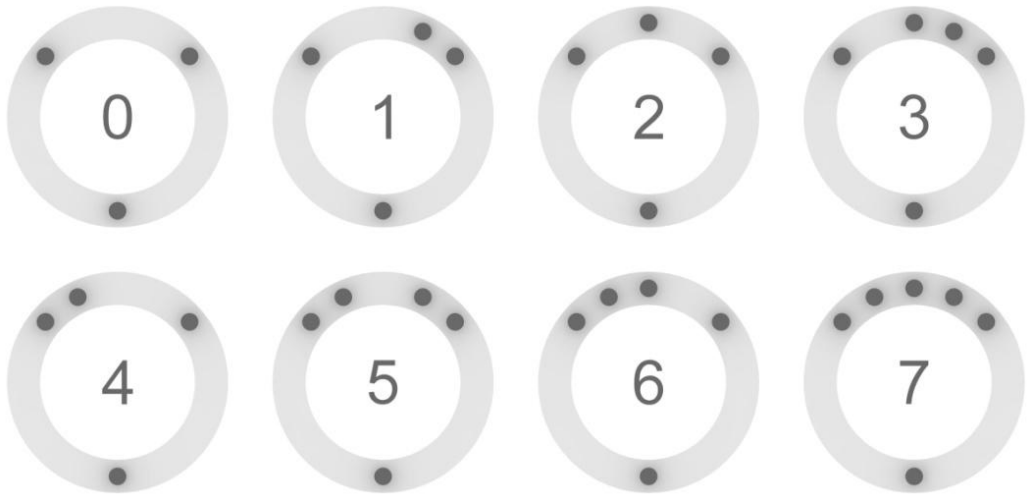


*Figura 67: Detalle de los manipuladores tangibles desarrollados. Modelo 3D (izquierda) y caso de uso real sobre un tabletop de marco óptico (derecha)*

En este trabajo se propone la utilización de elementos tangibles en combinación con superficies interactivas basadas en marcos ópticos, las cuales son capaces de reconocer múltiples contactos simultáneos (típicamente 30+). Aunque habitualmente los usuarios

utilizan sus propios dedos para interactuar con el sistema, realmente cualquier objeto puede ser utilizado para interrumpir el haz de luz en el marco óptico.

La principal contribución de este estudio consiste en el empleo de manipuladores pasivos formados por objetos circulares tridimensionales que cuentan con una serie de pines alojados en la parte inferior y que interrumpen el haz de luz generado por el marco óptico (Figura 67). El número y posición de estos pines en la parte inferior del manipulador permite identificarlo y detectar su posición y orientación sobre el tablero interactivo. Una gran ventaja adicional de este tipo de manipuladores es que su fabricación resulta extremadamente sencilla. A modo de ejemplo, a partir de los modelos geométricos en formato STL <sup>1</sup> de los manipuladores, se puede emplear cualquier impresora 3D para generar una versión física de los mismos.



*Figura 68: Detalle de la codificación del ID de los marcadores, siguiendo el sistema binario entre los dos pines que definen el lado corto del triángulo.*

Cada manipulador tangible debe contar con al menos tres pines (los vértices de un triángulo), de modo que como mínimo siempre se define un plano y el manipulador queda estable sobre el tablero (ver Figura 68, identificador '0'). El triángulo definido por estos tres pines debe ser isósceles, de este modo, tal y como se describe más adelante, no sólo se puede obtener la posición del manipulador sobre el plano, sino también su orientación.

<sup>1</sup> STL (siglas provenientes del inglés "STereo Lithography") es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora (CAD) que define geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD. Fue creado por la empresa 3D Systems, concebido para su uso en la industria del prototipado rápido y sistemas de fabricación asistida por ordenador.



Los dos lados mayores del triángulo isósceles, definido por los tres pines principales, se utilizan para calcular la posición del manipulador (centro) y su orientación. Los pines adicionales situados entre los dos que definen el lado corto del triángulo, se utilizan para codificar un identificador (ID) único en sistema binario.

En el ejemplo mostrado en la Figura 68, se utilizan tres pines adicionales (comprendidos entre los dos que definen el lado corto del triángulo) para codificar ocho ID diferentes, en código binario, que corresponden a: (0 - 000), (1 - 001), (2 - 010), (3 - 011), (4 - 100), (5 - 101), (6 - 110) y (7 - 111). Otro ejemplo, esta vez utilizando únicamente dos pines adicionales, puede observarse en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En este caso se pueden generar cuatro combinaciones diferentes: (0 - 00), (1 - 01), (2 - 10) y (3 - 11).

En general, con este método se pueden codificar un total de  $2^n$  identificadores diferentes, siendo 'n' el número máximo de pines que se pueden ubicar entre los otros dos que definen el lado corto del triángulo isósceles. El número máximo de pines está comprometido por la resolución de detección del marco óptico. Por lo tanto, una mayor resolución del marco óptico, permite poder ubicar un mayor número de pines en el lado corto del triángulo, dando lugar un número mayor de identificadores posibles. Este objetivo también se puede alcanzar aumentando el radio, y por ende el tamaño, de los manipuladores.

Para detectar la localización de los manipuladores tangibles sobre la superficie interactiva, se utilizan técnicas de 'clustering' de la información.

La gran mayoría de marcos ópticos del mercado ofrecen, además de un interfaz estándar de comunicaciones TUIO, un SDK<sup>1</sup> propio de desarrollo. Entre otras muchas opciones, este SDK ofrece un API<sup>2</sup> de funciones (y punteros a funciones) que retornan el número de pulsaciones simultáneas sobre el sistema y sus posiciones XY en unidades de pantalla (previamente el marco óptico debe ser calibrado con el propio software del fabricante) para relacionar el sistema formado por el marco óptico con el sistema formado por la pantalla, típicamente mediante el cálculo y utilización de una matriz de homografía). La Figura 69 muestra el esquema de una aplicación típica que hace uso de un SDK de marcos ópticos. Resaltados los módulos de funciones "callback" que se ejecutan automáticamente cada vez que el sistema detecta pulsaciones (derecha) o gestos de manipulación (izquierda). En el caso de la detección de manipuladores, únicamente se

---

<sup>1</sup> Un Kit de Desarrollo de Software o SDK (siglas en inglés de Software Development Kit) es generalmente un conjunto de herramientas de desarrollo de software que le permite al programador crear aplicaciones para un sistema concreto.

<sup>2</sup> Una Interfaz de Programación de Aplicaciones, abreviada como API (siglas en inglés de Application Programming Interface), es el conjunto de subrutinas, funciones y procedimientos que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software como una capa de abstracción.

atiende al reconocimiento de nuevas pulsaciones. El marco óptico utilizado en las experiencias es de la empresa "PQ Labs", y arroja una tasa de muestreo de 200 fps.

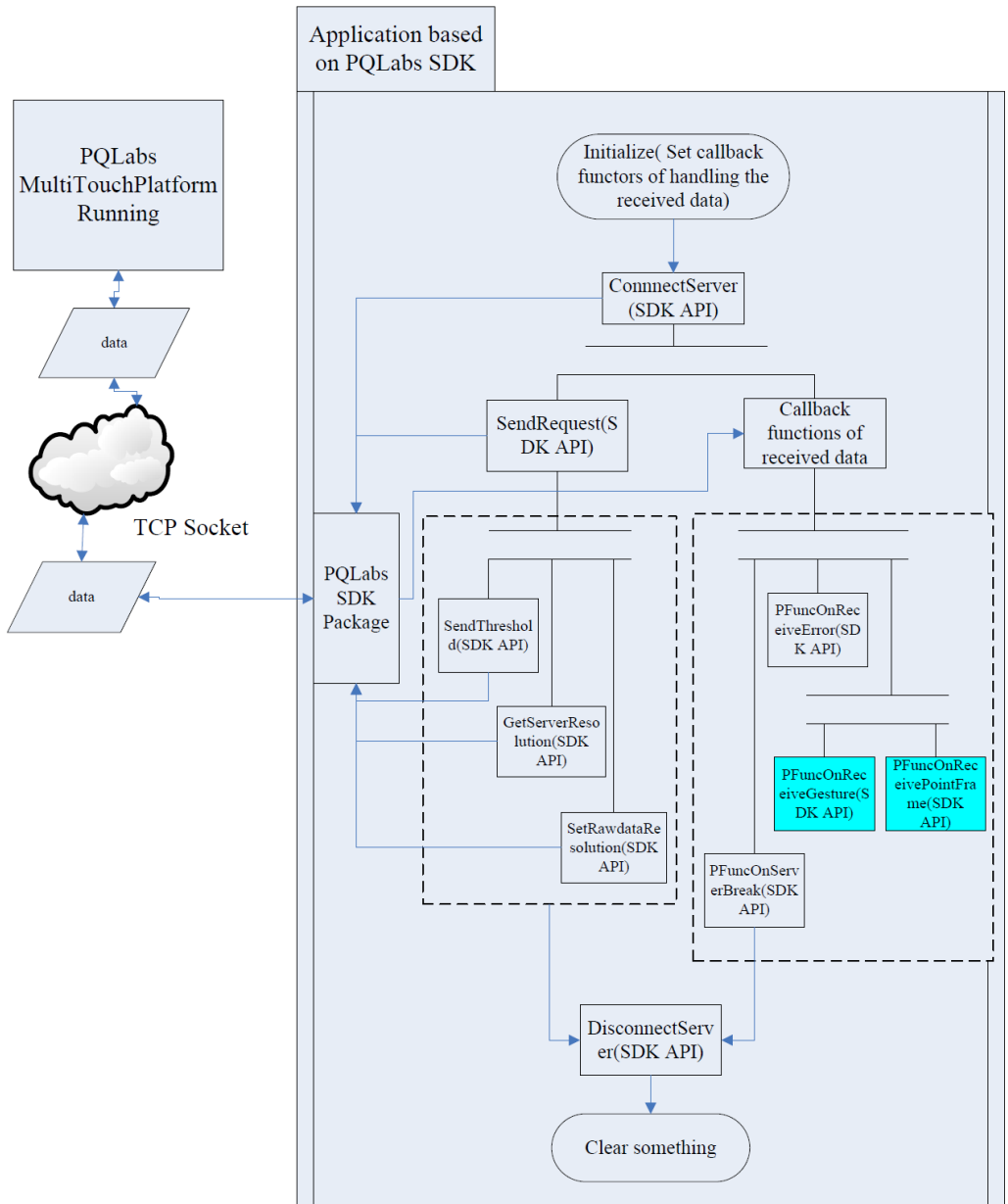
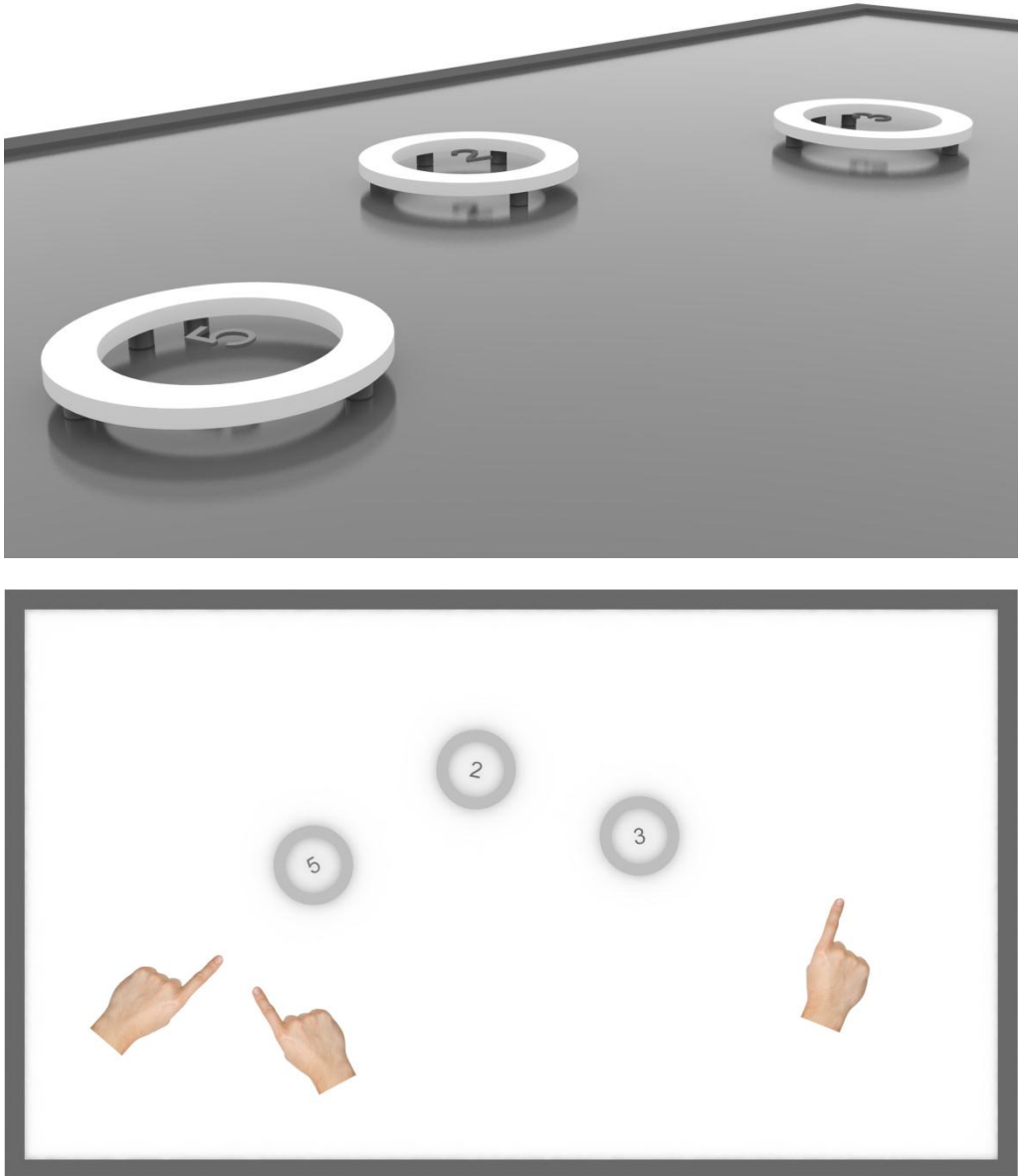


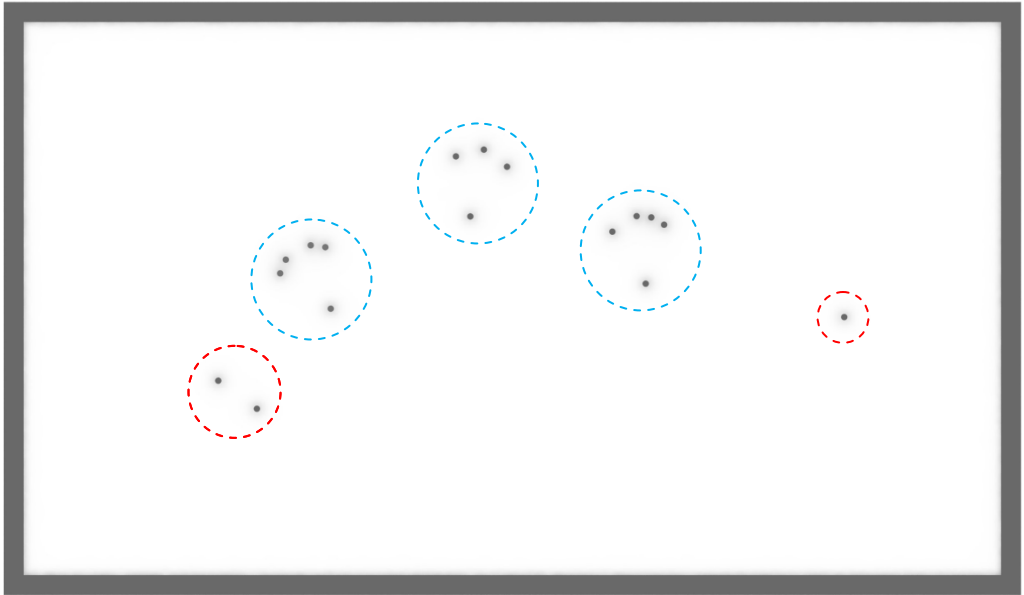
Figura 69: Esquema típico de aplicación basada en el uso del SDK distribuido por la empresa "PQ Labs" junto a sus marcos ópticos (<http://www.multitouch.com>).

El conjunto de puntos XY correspondientes a respectivas pulsaciones simultáneas sobre el sistema, puede ser interpretado como un conjunto de nubes de puntos, los cuales pueden ser agrupados automáticamente mediante técnicas de 'clustering'.



*Figura 70: Ejemplo de situación en la que se encuentran dispuestos sobre el tabletop tre elementos tangibles, junto la acción de usuarios con sus propios dedos.*

La Figura 70 muestra una representación en la que tres elementos tangibles, correspondientes a las codificaciones 2, 3, y 5, están dispuestos sobre el tablero (representan elementos similares a los mostrados en la Figura 68, en los que se pueden alojar un total de tres pines entre los que definen el lado corto del triángulo). Adicionalmente se representan tres pulsaciones simultáneas de dedos.

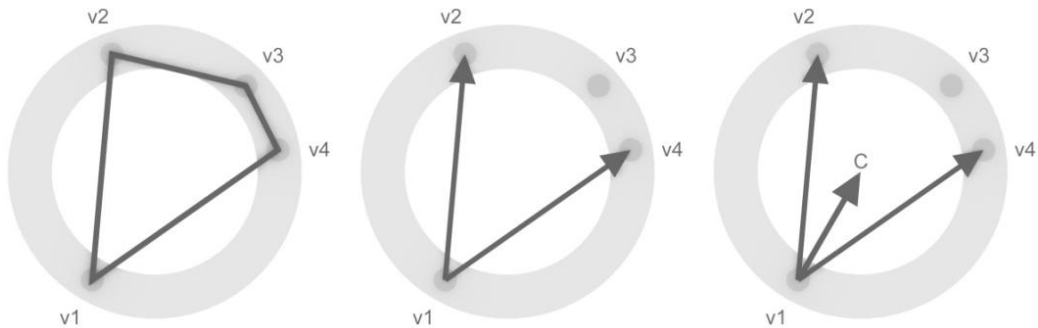


*Figura 71: Detalle de los manipuladores tangibles desarrollados. Modelo 3D (izquierda) y caso de uso real (derecha)*

Para determinar los clusters, se utiliza el algoritmo Quality Threshold (QT) [38]. A diferencia de otros algoritmos de clustering, como el algoritmo de las K-Medias, el algoritmo QT no necesita prefijar inicialmente el número de clusters a formar. Por contra se debe establecer una distancia máxima permitida para formar grupos a partir de las nubes de puntos, y el algoritmo decide automáticamente el número de clusters que se forman a partir de los puntos que cumplen con la condición. En el caso de los puntos generados por los manipuladores tangibles, esta distancia es conocida y corresponde con el diámetro de círculo del manipulador, más un cierto valor de umbral.

La Figura 71 muestra los cinco clusters extraídos por el algoritmo QT de una situación como la representada en la Figura 70. Puesto que cada manipulador cuenta con tres pines como mínimo, cualquier cluster formado por un número menor es descartado para posteriores análisis. De este modo, de la situación presentada en la Figura 71, únicamente se seleccionaran los tres clusters resaltados con un círculo azul sobre los que aplicar los sucesivos análisis. Por su parte, el sistema entiende que los dos clusters resaltados por círculos no han sido generados por un manipulador y por lo tanto les dará el tratamiento de

pulsaciones o gestos habituales, preparando las tramas TUIO adecuadas y enviándolas vía broadcast. Aunque el algoritmo QT es computacionalmente intensivo, el número de elementos a clasificar es pequeño, puesto que el número de pulsaciones simultáneas que se pueden dar sobre un marco óptico es relativamente pequeño (típicamente un máximo de entre 30 y 50 pulsaciones simultáneas), por lo que la clasificación en tiempo real es totalmente posible.



*Figura 72: Extracción de la información de posición y orientación de un manipulador.*

Un vez que los clusters potenciales han sido localizados, para cada uno de ellos se obtiene el polígono convexo que envuelve a todos los puntos [28] (Figura 72). A continuación, se definen los vectores  $\overline{v_1v_2}$  y  $\overline{v_1v_4}$  a partir de los dos lados más largos del polígono. El vector de dirección del manipulador se define como la suma de estos dos vectores. Adicionalmente se obtiene el centro  $C$  a partir de la conversión del vector de dirección en su correspondiente unitario y multiplicándolo por el radio del círculo del manipulador.

Para averiguar el identificador ID del elemento tangible se utilizan técnicas de coincidencia de formas (shape matching) [100]. Particularmente en la implementación de este trabajo se utiliza el algoritmo descrito en el artículo de E. Arkin et Al. [1]. Una ventaja de este algoritmo es que no se ve afectado por la rotación del polígono a clasificar y es invariante frente a variaciones en la escala y punto de referencia. Adicionalmente ofrece un coste computacional razonable y permite la identificación en tiempo real de los polígonos asociados a los distintos manipuladores tangibles. Dependiendo del número de pines de identificación, el sistema almacena una colección de los polígonos posibles en su base de datos, asignando un identificador a cada uno de ellos, según el sistema binario antes descrito. La Figura 73 muestra la colección de polígonos posibles suponiendo que se dispone de dos pines para identificación (lo que da lugar a cuatro posibles combinaciones). Cotejando la forma coincidente, con un cierto umbral de error, el sistema asignará al manipulador tangible el identificador correspondiente. Si no se encuentra una forma

coincidente con la tolerancia de error permitida, el sistema no asignará ningún manipulador al conjunto de puntos y los tratará como pulsaciones o gestos convencionales.

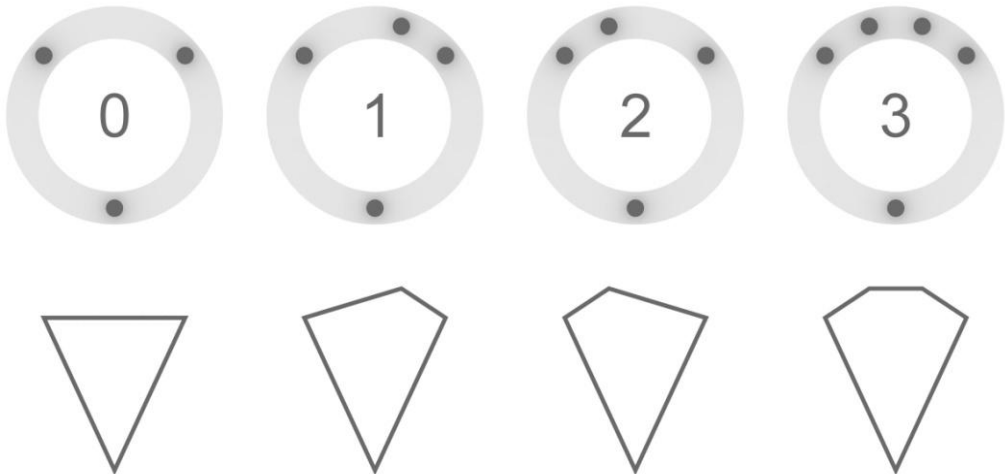


Figura 73: Polígonos asociados a cuatro manipuladores distintos, identificados por sus pines inferiores.

Una vez identificados los manipuladores dispuestos sobre el tabletop, el sistema encapsula en tramas TUIO su ID, su posición (centro) y su orientación (vector de dirección), las cuales son reenviadas vía broadcast a través de la red, mediante UDP/IP (o TCP/IP) por el puerto 3333. Esta encapsulación de información la realiza una capa de software intermedia (middleware), cuya estructura básica se representa en la Figura 74. De este modo, el desarrollador de aplicaciones únicamente recibe tramas TUIO [43], que encapsulan tanto pulsaciones simples como información asociada a los manipuladores físicos tangibles.

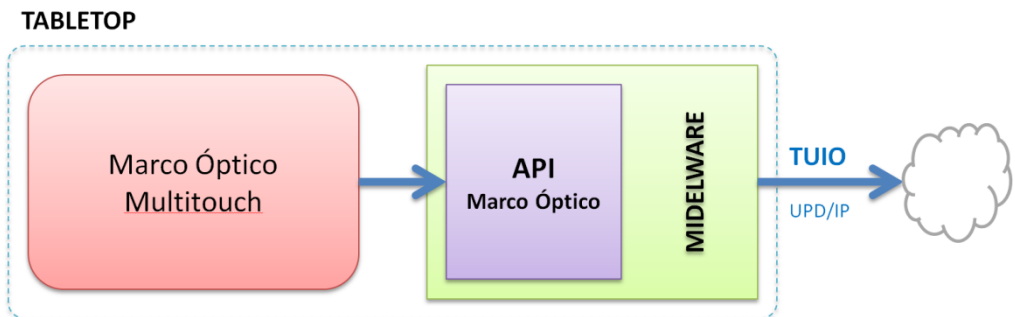


Figura 74: Estructura del "middleware" con soporte de manipuladores tangibles y encapsulación en tramas TUIO

De la estructura de una trama TUIO (Tabla 24), el sistema únicamente codifica los parámetros necesarios, los cuales son: session ID, class ID, position y angle (únicamente si se trata de un manipulador).

"Class ID" codifica con un número entero el tipo de objeto TUIO. En esta implementación se codifica con un "0" una pulsación sobre el tabletop, con el rango de "1..10" a manipuladores tangibles de marco óptico (posibilitando 10 diferentes), y con el rango "11..20" a marcas fiduciales (tal y como se comenta en el siguiente apartado). Para una clase dada, "Session ID" representa un identificador único para cada objeto TUIO de ese tipo dispuesto sobre el tabletop. El identificador se mantiene mientras el dedo, manipulador tangible o marca fiducial se encuentra dispuesto sobre el tablero. "Position" está compuesto por tres números en coma flotante que identifican las posición (x,y,z) del objeto sobre el tablero. En esta implementación la componente 'z' toma valores distintos de '0' únicamente en el caso de tratarse de marcas fiduciales. En el caso de manipuladores físicos o marcas fiduciales, la orientación de las mismas se codifica a través del parámetro "Angle". En el caso de manipuladores físicos, únicamente se codifica la rotación alrededor del eje-Z (normal al plinto del tabletop).

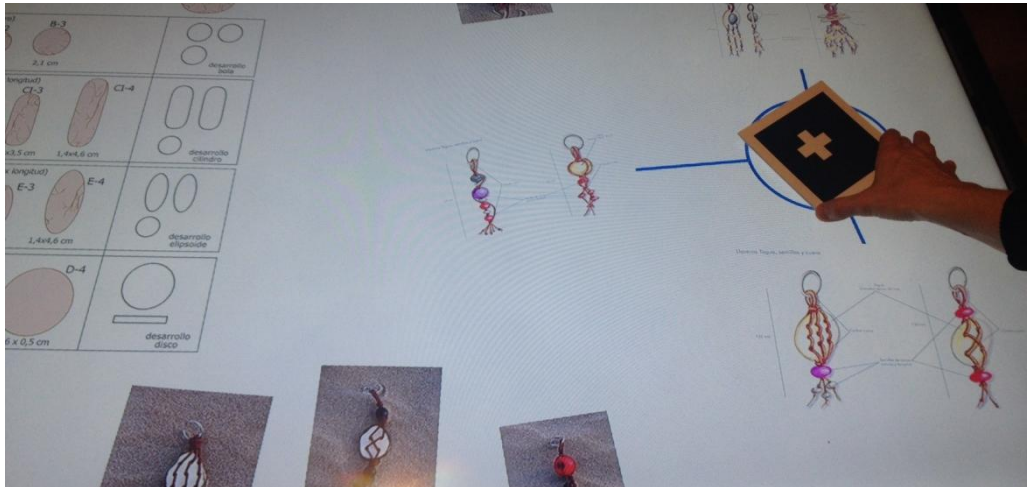
Parámetro	Significado	Tipo de datos
s	Session ID (temporary object ID)	int32
i	Class ID (e.g. marker ID)	int32
x, y, z	Position	float32, range 0..1
a, b, c	Angle	float32, range 0..2PI
w, h, d	Dimension	float32, range 0..1
f, v	Area, Volume	float32, range 0..1
X, Y, Z	Velocity vector (motion speed & direction)	float32
A, B, C	Rotation velocity vector (rotation speed & direction)	float32
m	Motion acceleration	float32
r	Rotation acceleration	float32
P	Free parameter	type defined by OSC message header

*Tabla 24: Parámetros de una trama TUIO.*

## **7.2. Desarrollo de manipuladores tangibles híbridos con marcas fiduciales**

Para el caso de utilización de tabletops proyectivos, como el presentado en el Capítulo 3, el sistema incorpora la posibilidad de utilización de elementos tangibles basados en marcas fiduciales. Este tipo de elementos presentan como ventaja la facilidad de fabricación (un marca impresa en cualquier impresora y adherida a una tarjeta de cartón pluma o similar). Por contra pueden presentar problemas de visibilidad si la mano solapa la marca mientras está siendo manipulada. Sin embargo en las pruebas se constató que los

usuarios se acostumbran rápidamente a este inconveniente y lo resuelven de modo prácticamente intuitivo manipulando adecuadamente la tarjeta o la marca.



*Figura 75: Ejemplo de utilización de marca fiducial como elemento tangible*

Para implementar esta funcionalidad, el sistema tabletop debe contar con una cámara dispuesta por encima del tablero. La óptica de la cámara debe permitir ajustar una distancia focal de modo que, dependiendo de la altura a la que esté instalada, la imagen capturada recoja la totalidad del tablero. Preferiblemente debe tratarse de una cámara que permita una alta tasa de captura frente a condiciones de iluminación normales. No obstante, en la mayoría de las ocasiones, una cámara tipo webcam de gama media/alta puede cubrir los requisitos del sistema. En el caso del tabletop presentado en el Capítulo 3, el sistema ya cuenta con dos cámaras para el reconocimiento de dedos y manos, aprovechando una de ellas para el reconocimiento paralelo de marcas fiduciales.

Previo a la utilización de las marcas como elementos tangibles, es necesario un proceso de calibración que correlacione las posiciones de las marcas sobre el tabletop con las posiciones respecto al sistema de referencia de la imagen capturada por la cámara. El proceso de calibración se realiza utilizando las herramientas que proporciona la librería de visión artificial OpenCV [10]. Para ello, el sistema proyecta un patrón ajedrezado sobre el tablero, que las funciones de OpenCV utilizan para corregir la distorsión de la cámara (tanto los parámetros intrínsecos como extrínsecos) y ajustar la corrección de perspectiva mediante el cálculo de la correspondiente matriz de homografía.

Una vez calibrado el sistema, a nivel software se utilizan las propias librerías de reconocimiento de marcas fiduciales desarrolladas en LabHuman, tal como se describe en E. Candela et Al. [13]. Al igual que en el caso de los manipuladores tangibles para marcos ópticos, el sistema codifica tramas TUIO que son transmitidas en modo broadcast a través



del puerto 3333 de UDP. En esta caso, las marcas fiduciales se clasifican con un "Class ID" en un rango de "11 a 20", posibilitando la utilización de 10 patrones distintos de marcas fiduciales.

Puesto que en un espacio de trabajo y aprendizaje colaborativo distribuido puede darse el caso de utilizar simultáneamente tanto sistemas tabletop proyectivos como basados en marcos ópticos, ambos tipos de elementos tangibles pueden ser combinados en un modelo híbrido que reúna a los dos tipos en un único manipulador físico. De este modo, un mismo manipulador puede ser utilizado indistintamente en ambos sistemas, facilitando la manipulación e intercambio de información entre distintos grupos de trabajo que hacen uso de tecnologías diferentes, tal y como se describe en el siguiente apartado.

Tal y como se muestra en la Figura 76, la implementación de este tipo de manipuladores híbridos sigue siendo muy sencilla. Basta con adherir una impresión con la marca fiducial sobre la cara superior del manipulador para marcos ópticos.



*Figura 76: Representación de un manipulador tangible híbrido*

### **7.3. Extensión del interfaz natural del modelo de espacio colaborativo distribuido mediante la incorporación de manipuladores tangibles**

La incorporación de manipuladores tangibles al modelo de espacio de trabajo colaborativo distribuido permite simplificar las labores básicas de manejo de la información y manipulación del interfaz, convirtiéndolas en operaciones más naturales que

---

lo usuarios identifican como habituales en un entorno físico real. De este modo colaboran activamente en la generación de un espacio bajo en concepto de realidad mezclada.

En cualquier caso, es importante reseñar que estas operaciones asociadas a manipuladores tangibles no sustituyen, sino que complementan a las operaciones de manipulación de la información que ya incorpora el sistema mediante acciones gestuales, tal y como se describen en el Capítulo 4.

### ***7.3.1. Manipulación del plano de trabajo***

Las operaciones de zoom y encuadre del plano del trabajo en el marco del dispositivo pueden ser realizadas fácilmente y de manera intuitiva mediante la utilización de un único manipulador tangible. En el caso de no utilizar manipuladores tangibles, lo usuarios deben desbloquear las operaciones sobre el plano de trabajo antes de realizarlas, pulsando el icono representativo de un candado cerrado que se muestra en la esquina inferior izquierda del dispositivo. Una vez realizadas las operaciones de zoom y encuadre, se debe volver a pulsar el icono, esta vez representando un candado abierto, para volver a bloquear el espacio de trabajo. Esto es así para evitar acciones involuntarias de zoom y escalado por parte de los usuarios, máxime cuando se pueden reunir varios alrededor del tablero, lo cual puede tener efectos desconcertantes.

En el caso de utilizar un manipulador tangible esta acción es innecesaria, pues el simple hecho de colocar el manipulador, asociado a esta acción, sobre las superficie del dispositivo, provoca el desbloqueo automático del espacio de trabajo, mientras que su retirada lo vuelve a bloquear. A este respecto, el manipulador puede ser depositado sobre cualquier posición del tablero, independientemente de si debajo se encuentra dispuesto algún ítem de información o no. Una vez dispuesto sobre la superficie del dispositivo, los movimientos del mismo sobre la misma suponen desplazamientos relativos de la cámara asociada al dispositivo sobre el plano de trabajo, dando lugar al efecto de encuadre.

De igual modo, un movimiento de rotación en sentido horario provoca un aumento relativo de la distancia focal de la cámara virtual, dando lugar a un efecto de zoom de ampliación. Por su parte un movimiento de rotación en sentido anti horario provoca el efecto contrario.

### ***7.3.2. Manipulación de información en modo local***

En modo local el sistema permite asociar operaciones de almacenamiento y eliminación de información del tablero.

La operación de almacenamiento de información permite que un manipulador tangible colocado sobre el tablero se comporte como un ítem adicional, al que poder enlazar otros ítems de información que quedan almacenados en él, hasta que se desligan del mismo. Una vez colocado el manipulador asociado a la operación sobre el tablero (de cualquiera de los tipos), aparece un círculo alrededor del mismo envolviéndolo (ver Figura 75). Al manipulador, representado por su círculo externo, se le pueden enlazar ítems de información simplemente arrastrándolos hasta tocar el círculo. En ese momento se crea un enlace de relación que es representado gráficamente. Repitiendo la operación se deshace el enlace creado previamente.

Toda la información enlazada queda asociada al manipulador, de modo que si éste se retira del tablero, la información enlazada también desaparece. Sin embargo esta información sigue estando almacenada en el servidor de aplicación, que además guarda la relación de la misma con el identificador del manipulador tangible. En el momento en el que el manipulador vuelve a colocarse sobre el tablero, todos los ítems de información asociados al mismo vuelven a aparecer en las mismas posiciones relativas y con las mismas escalas de representación. En cualquier momento se pueden seguir añadiendo o recuperando ítems de información.

Cabe destacar que por motivos de sencillez en el manejo, si se enlaza un ítem que representa un nodo padre en una relación jerárquica, queda enlazado (y por lo tanto almacenado) el ítem padre junto con todos sus ítems descendientes, manteniendo la relación jerárquica entre ellos. En estos casos, una vez establecido el enlace, el sistema considera a todos los objetos pertenecientes a la relación jerárquica como un único ítem global de información, por lo que únicamente es posible volver a recuperar toda la estructura, en lugar de los ítems individuales que la componen.

A nivel local también se implementa la operación de eliminación de información del tablero. Su funcionamiento es muy similar al caso de la operación de almacenamiento de la información. Una vez colocada sobre el tablero el manipulador tangible asociado a esta operación, nuevamente se pueden enlazar ítems de información sobre el mismo arrastrándolos hasta tocarlos. En este caso el enlace se representa mediante una línea discontinua roja, advirtiendo que se trata de una operación de borrado. Igualmente, es posible desligar un ítem volviendo a repetir la acción. Sin embargo, a diferencia del caso de la operación de almacenamiento, esta vez, al retirar la marca, la información desaparece y no se guarda almacenada en el servidor de aplicación.

### 7.3.3. Manipulación de información en modo distribuido

Siguiendo los principios de los Interfaces Naturales, en un entorno de trabajo colaborativo distribuido, compuesto por múltiples superficies interactivas, es importante dotar al sistema de un mecanismo sencillo y natural que permita el movimiento de información entre los distintos dispositivos, contribuyendo de este modo en la formación de un espacio de Realidad Mezclada que permita el trasiego de información de un modo tangible y metafórico de la realidad.

Para ello, las operaciones de "copiado y pegado" y "cortado y pegado" que ya se podían realizar de modo gestual sobre el plano de trabajo, tal y como se describe en el Capítulo 3, también son realizables mediante manipuladores tangibles asociados a las misma (Figura 76). Tal y su operativa habitual, ambas operaciones son similares, con la diferencia que mientras la operación de "copiado y pegado" mantiene una copia de la información sobre la superficie interactiva original, la de "cortado y pegado" la elimina de la misma.

Ambas operaciones se pueden realizar de un modo muy natural simplemente colocando el manipulador asociado encima de un ítem de información mostrado en la superficie del tabletop. Igual que en casos anteriores, si de éste ítem dependen otros jerárquicamente, la operación afecta tanto al nodo padre como a la estructura descendiente completa.

Esta información, copiada o cortada, queda almacenada temporalmente a modo de "portapapeles" en el servidor de aplicación. Cuando el manipulador es depositado nuevamente sobre el mismo u otro tabletop, la información es nuevamente depositada automáticamente sobre su superficie.

Nótese que también es posible utilizar la operación de almacenamiento de información, descrita en el apartado anterior, como alternativa a la operación de "copiado y pegado". La única diferencia estriba en el modo de operación, que en este caso se realiza mediante operaciones de enlace y desenlace de ítems con el manipulador.

Es importante reseñar que las operaciones vinculadas con manipuladores tangibles tienen carácter global a todo el sistema. De este modo se permite la utilización de estos elementos incluso entre grupos de trabajo ubicados en lugares remotos. A modo de ejemplo, si dos equipos conectados al mismo servidor de aplicación disponen de sendas implementaciones del mismo manipulador tangible (correspondiente al mismo ID) asociado a la operación de "copiado y pegado", uno de ellos puede iniciar la operación de "copiado" con su manipulador y el otro equipo puede completar la operación de "pegado" con el suyo propio. Esta forma de trabajo invita un entendimiento de manipulación físico de la información incluso entre equipo ubicados en lugares remotos.

## **7.4. Conclusiones**

En este capítulo, se ha presentado un mecanismo novedoso de interacción basado en el diseño e implementación de un nuevo tipo de manipuladores tangibles pasivos, capaces de operar sobre superficies interactivas (tipo tabletop) construidas con marcos ópticos.

La disponibilidad y gradual disminución de los costos de pantallas planas de televisión de gran formato, junto con el desarrollo de la tecnología en marcos ópticos interactivos multitáctiles de alta resolución, supone una interesante opción en la implementación de dispositivos tabletop con una gran y precisa superficie interactiva y que ofrecen una calidad de imagen excelente (en resolución y contraste) a precios razonables.

Con la incorporación de elementos tangibles, las superficies interactivas basadas en dispositivos tabletop pueden integrarse eficazmente en espacios de trabajo colaborativo distribuido que generan entornos de Realidad Mezclada fundamentados en el concepto de Computación Ubicua. La incorporación de este tipo de elementos permite una manipulación tangible de la información y una vía natural de intercambio de la misma entre los distintos dispositivos que conforman el sistema. La utilización de los manipuladores tangibles ofrece al usuario metáforas de uso similares a las que se dan en la realidad, permitiéndole percibir la información de un modo físico.

La solución propuesta de manipuladores tangibles destinados a su utilización en sistemas tabletop implementados mediante marcos ópticos, se caracteriza por ser una solución totalmente pasiva, que se aprovecha del propio hardware del sistema sin requerir de ningún tipo de dispositivo adicional. Su implementación es extremadamente sencilla y económica, pudiendo a modo de ejemplo se fácilmente generados mediante impresión 3D.

Sin embargo, en aras de conseguir espacios de trabajo y aprendizaje más cercanos al concepto de Realidad Mezclada, se propone la configuración de entornos mixtos en los que se utilicen tanto dispositivos tabletop de tipo proyectado (como el sistema descrito en el Capítulo 3) los cuales permiten la compartición simultánea de mesas de trabajo reales con superficies interactivas, conjuntamente con dispositivos tabletop basados en grandes pantallas planas y marcos ópticos, los cuales a su vez resultan muy interesantes por su relación prestaciones/coste. En el caso de este tipo de entornos, se ha propuesto un tipo de manipuladores tangibles híbridos que resultan compatibles con sistemas tabletop de tipo proyectivo y sistemas basados en marcos ópticos, y que por tanto permiten la manipulación e intercambio de información entre ambos tipos de dispositivos.

Adicionalmente se ha desarrollado una capa de software intermedia (middleware que permite integrar este tipo de manipuladores tangibles al modelo de espacio de trabajo colaborativo distribuido, encapsulando sus eventos tramas del protocolo de comunicaciones TUIO.

## 8.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

A lo largo de este trabajo de Tesis, se ha desarrollado un modelo de espacio distribuido de aprendizaje colaborativo basado en la utilización de dispositivos tabletop, los cuales ofrecen una gran superficie de trabajo horizontal interactiva, que facilita el trabajo en equipo facilitando la comunicación entre los usuarios en la forma "cara-a-cara".

El trabajo se ha desarrollado bajo la premisa de implementación de Interfaces Naturales, escondiendo la complejidad de la tecnología a los estudiantes y evitando de este modo cualquier tipo de interferencia en el proceso educativo.

El espacio de trabajo desarrollado permite implementar orquestaciones de aula basadas en el concepto de Espacios de Realidad Mezclada, un subconjunto del concepto más amplio de Computación Ubicua.

Bajo esta premisa se han desarrollado aplicaciones educativas sobre la plataforma de espacio colaborativo distribuido, que permiten transformar de forma automática las superficies propias del aula, tales como pupitres y mesas de trabajo de los alumnos, en superficies interactivas. De este modo la tecnología siempre está presente en el aula, en modo latente, activándose de forma automática cuando los materiales que coloca el alumno sobre la mesa así lo requieren, aumentando sus contenidos, o cuando se requiere de la ejecución de aplicaciones específicas de apoyo a la docencia.

Este modelo fue evaluado en un contexto educativo real, desarrollado en tres centros educativos, donde respectivos grupos de alumnos de educación primaria cursaron determinadas unidades temáticas de la asignatura de matemáticas utilizando la herramienta desarrollada. La evaluación se realizó teniendo en cuenta tres parámetros: eficiencia, usabilidad y motivación.

La hipótesis general de partida consistía en que gracias al uso de interfaces naturales y espacios de realidad mezclada, los alumnos se benefician de la tecnología sin que esta interfiera negativamente en su proceso educativo, alcanzando mayores cotas de motivación en clase, que repercuten positivamente en las calificaciones finales obtenidas.

Los resultados arrojados por las evaluaciones concuerdan con la hipótesis de partida. En todos los casos los test de usabilidad muestran que los alumnos aceptan la tecnología desarrollada como algo natural para la que no necesitan entrenamiento previo y cuyo manejo les resulta en todo momento sencillo. Desde el punto de vista de la satisfacción, los alumnos muestran mayoritariamente agrado en el trabajo con las nuevas herramientas, mostrando el deseo de cursar más clases de este tipo. Por su parte, los test de motivación mejoran en todos los casos algunos de sus parámetros, principalmente y de forma más significativa el correspondiente a la categoría de "esfuerzo". Finalmente, los resultados en cuanto a eficiencia resulta positivos en todos los casos. En todos los casos en los que se utilizó la nueva herramienta, los alumnos obtuvieron mejores calificaciones de forma significativa.

El desarrollo de las herramientas, del modelo de sistema de evaluación y la descripción y resultados arrojados en las experiencias desarrolladas, queda reflejado en los trabajos de investigación [13, 83, 87, 88].

La extensión del modelo a un espacio colaborativo distribuido, simula un gran plano de trabajo común a todos los equipos conectados al sistema. Sobre él, los distintos equipos pueden añadir y manejar información digital a través de sus propios dispositivos tabletop asociados, de forma similar a como se realizaría sobre mesas de trabajo tradicionales.

Este modelo permite implementar de una forma sencilla complejos escenarios de trabajo colaborativo y orquestaciones de aula destinadas a tareas de aprendizaje colaborativo, admitiendo incluso situaciones en las que los distintos equipos de trabajo se encuentren en ubicaciones remotas.

El modelo fue testado mediante una prueba piloto en el marco de un proyecto de diseño industrial que se desarrolló integrando diversos equipos de trabajo ubicados en distintas ciudades y países. El sistema desarrollado permitió integrar a los distintos equipos participantes en una plataforma de trabajo colaborativo común, facilitando el tratamiento, intercambio y análisis de la información, dando respuesta a una de las principales problemáticas que se plantaban en el proyecto. El interfaz natural de la herramienta permitió que esta fuera utilizada por los distintos equipos sin que ninguno de sus miembros hubiera recibido entrenamiento previo en la misma. Los detalles de implementación del sistema y los resultados de la prueba piloto quedan reflejados en el trabajo de investigación [84].

Adicionalmente, sobre el modelo de espacio colaborativo distribuido, se han desarrollado dos herramientas específicas destinadas principalmente a su utilización en entornos educativos, aunque su campo de aplicación se puede extender a otros contextos profesionales. Particularmente se ha desarrollado una herramienta para la implementación de mapas conceptuales y otra de fomento de la creatividad. En ambos casos, las

herramientas se integran y hacen uso de las capacidades e interfaz natural que ofrece el modelo general de espacio colaborativo distribuido. Ambas herramientas fueron evaluadas con el objetivo de validarlas como herramientas adecuadas en tareas educativas.

La evaluación de la herramienta de fomento de la creatividad se desarrolló en un entorno educativo real sobre un curso de estudiantes de Ingeniería Técnicas en Diseño Industrial, desde el punto de vista de la eficiencia la usabilidad, arrojando resultados en todos los casos. Resultó particularmente destacable la valoración positiva de los alumnos respecto a la capacidad del sistema de permitir enviar información al plano de trabajo mediante mensajes de EMail y Twitter. Esta característica permitió a los alumnos poder enviar información acerca de nuevas ideas en el momento en el que estas se les ocurrían, independientemente de que tuvieran lugar en momentos diferente a los intervalos temporales en lo que tenían lugar las sesiones de creatividad, aprovechando de este modo la ventaja de la inmediatez. Los detalles del desarrollo e implementación la herramienta, conjuntamente con los resultados de evaluación arrojados, se publicaron en el trabajo de investigación [81].

Por su parte, la herramienta para la generación de mapas conceptuales fue evaluada desde el punto de vista de la usabilidad, con el objetivo de comprobar las ventajas de la utilización de un interfaz natural en un contexto de aprendizaje colaborativo distribuido. Para ello se realizaron dos experiencias en contextos educativos reales en los que se hacía uso de un esquema de aprendizaje colaborativo. En general en todos los casos los resultados arrojados fueron satisfactorios, resultando muy similares en ambas experiencias. Sin embargo, en ambos casos la peor marca obtenida coincidía en el apartado del cuestionario encargado de evaluar la sencillez del sistema como herramienta de trabajo colaborativo. En conversaciones con los alumnos, se detectó la existencia de cierta dificultad a la hora de compartir información entre los distintos grupos debido a que operaciones propuestas por la plataforma para tal fin, no les resultaban lo suficientemente cómodas. Los detalles del desarrollo e implementación la herramienta, conjuntamente con los resultados de evaluación arrojados, se publicaron en los trabajos de investigación [82, 86].

Por este motivo se planteó la incorporación de manipuladores tangibles al modelo de espacio de trabajo colaborativo distribuido, que facilitasen éste tipo de operaciones de una forma natural, representando metáforas de uso al caso de manipulación y traslado de la información física en el mundo real.

La investigación en el diseño del sistema dio lugar al desarrollo de un novedoso concepto de manipuladores tangibles, adaptados a su utilización en sistemas tabletop implementados mediante tecnología de marco óptico. Estos manipuladores se caracterizan por resultar una solución totalmente pasiva que no requiere de ningún tipo de fuente de alimentación ni de ningún hardware adicional, presentando una solución sencilla y económica pero a la vez ofreciendo altas prestaciones. Adicionalmente, en aras de poder



configurar orquestaciones de aula más complejas, en las que intervienen distintos tipos de dispositivos y tecnologías, se desarrolló un modelo de manipulador híbrido susceptible de ser utilizado tanto en dispositivos tabletop basados en marcos ópticos como en sistemas tabletop del tipo proyectivos, resultando igualmente pasivos y sencillo de implementar. El resultado de este trabajo de investigación quedó reflejado en [85].

Como propuestas de trabajo futuro, se pretenden desarrollar nuevas aplicaciones sobre el modelo de espacio colaborativo distribuido que amplíen sus posibilidades de aplicación en entornos de aprendizaje colaborativo basados en metodologías constructivistas.

Del mismo modo se pretenden ampliar las capacidades del interfaz, haciéndolo cada vez más natural. Para ello se pretende seguir investigando en el desarrollo de elementos tangibles, ampliando las posibilidades de los ya desarrollados. A modo de ejemplo se pretenden ampliar las capacidades de interactividad de los elementos tangibles desarrollados para marcos ópticos permitiendo pulsaciones a través de su ventana central.

De forma paralela se pretende integrar un número cada vez de tipos de dispositivos tabletop, implementados a partir de otro tipo de tecnologías, como las basadas en superficies resistivas, capacitivas o de retroproyección. Estos dispositivos suelen ser compatibles con el protocolo TUIO, con lo cual su compatibilidad con el sistema desarrollado está garantizada. Sin embargo se pretende seguir investigando en el desarrollo de manipuladores tangibles híbridos que resulten cada vez compatibles con un mayor número de tecnologías.

Por otra parte se pretenden ampliar las capacidades del espacio colaborativo distribuido como espacio de realidad mezclada, permitiendo nuevas vías de introducción de la información, tales como escaneados 3D, etc. Del mismo modo se pretenden incorporar mecanismos que permitan extraer información del mundo digital al mundo real a través de dispositivos tales como impresoras y sistemas de prototipado rápido tales como impresoras 3D y sistemas de corte láser. De igual modo se pretenden incorporar al modelo dispositivos inmersivos, tales como cascos de realidad virtual y sistemas de realidad aumentadas.

Otro campo en que se tienen previsto investigar es el desarrollo de sistemas tabletop que permitan una visualización estereoscópica de la información en geometría 3D, así como utilizar nuevos dispositivos y desarrollar mecanismos que permitan su manipulación.

Desde otro punto de vista, se pretenden realizar pruebas más profundas de evaluación del sistema, acogiendo a un mayor número de estudiantes y ocupando periodos más largos en el tiempo, que permitan diseñar mejores esquemas de diseños cuasi experimentales con

el objetivo de realizar mejores análisis del impacto de estas herramientas en los procesos educativos.

Finalmente se pretenden reforzar e intensificar los mecanismos de captura automática de las acciones y eventos generados sobre el sistema por parte de los alumnos, con el objetivo de ofrecer mejores métricas a los profesores que les permitan realizar una mejor evaluación del aprendizaje tanto a nivel grupal como individual. De igual modo se pretende investigar en la aplicación de técnicas de minería de datos en el análisis de los flujos de información recogidos en los históricos.



---

## 9. REFERENCIAS

- [1] Arkin, E.M., Chew, L.P., Huttenlocher, D.P., Kedem, K. and Mitchell, J.S. 1991. An efficiently computable metric for comparing polygonal shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*. 3 (1991), 209–216.
- [2] Barsalou, L.W. 2008. Grounded cognition. *Annu. Rev. Psychol.* 59, (2008), 617–645.
- [3] Bell, J.T. and Fogler, H.S. 1997. Ten steps to developing virtual reality applications for engineering education. *Ann Arbor*. 1001, (1997), 48109–2136.
- [4] Bell, J.T. and Fogler, H.S. 1995. The investigation and application of virtual reality as an educational tool. *Proceedings of the American Society for Engineering Education* (1995).
- [5] Benyon, D. and Mival, O. 2012. Blended spaces for collaborative creativity. *Proceedings of Workshop on Designing Collaborative Interactive Spaces, AVI* (2012).
- [6] Bhalla, M.R. and Bhalla, A.V. 2010. Comparative study of various touchscreen technologies. *International Journal of Computer Applications*. 6, 8 (2010), 12–18.
- [7] Billinghamurst, M., Kato, H. and Pouppeyev, I. 2001. MagicBook: Transitioning Between Reality and Virtuality. *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (Seattle, Washington, 2001), 25–26.
- [8] Billinghamurst, M., Kato, H. and Pouppeyev, I. 2001. The MagicBook: a transitional AR interface. *Computers & Graphics*. 25, (2001), 745–753.
- [9] Bonsiepe, G., Estrany, S.P. i and Ramió, J.R. i 1978. *Teoría y práctica del diseño industrial: elementos para una manualística crítica*. Gustavo Gili.
- [10] Bradski, G. and Kaehler, A. 2008. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly Media, Inc.
- [11] Bransford, J.D. 2000. *How people learn : brain, mind, experience, and school*. National Academy Press.
- [12] Campbell, D.T., Stanley, J.C. and Gage, N.L. 1963. *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Houghton Mifflin Boston.
- [13] Candela, E.S., Pérez, M.O., Romero, C.M., López, D.C.P., Herranz, G.S., Contero, M. and Raya, M.A. 2014. HumanTop: a multi-object tracking tabletop. *Multimedia tools and applications*. 70, 3 (2014), 1837–1868.
- [14] Canny, J. 1986. A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 6 (1986), 679–698.

- [15] Cohen, J. 2013. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic press.
- [16] Crook, C. 1996. *Computers and the collaborative experience of learning*. Psychology Press.
- [17] Davies, J. and Brember, I. 1994. The reliability and validity of the “Smiley” scale. *British Educational Research Journal*. 20, 4 (1994), 447–454.
- [18] Driscoll, M.P. 2005. *Psychology of learning for instruction*. Allyn & Bacon, Inc.
- [19] Dünser, A., Grasset, R. and Billinghamurst, M. 2008. *A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies*. Human Interface Technology Laboratory New Zealand.
- [20] Enyedy, N., Danish, J.A., Delacruz, G. and Kumar, M. 2012. Learning physics through play in an augmented reality environment. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*. 7, 3 (2012), 347–378.
- [21] Falcão, T.P. and Price, S. 2009. What have you done! the role of ‘interference’ in tangible environments for supporting collaborative learning. *Proceedings of the 9th international conference on Computer supported collaborative learning-Volume 1* (2009), 325–334.
- [22] Felder, R.M. and Silverman, L.K. 1988. Learning and Teaching Styles in Engineering Education. *Engineering Education*. 78, 7 (1988), 674–681.
- [23] Fitzmaurice, G.W., Ishii, H. and Buxton, W.A. 1995. Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (1995), 442–449.
- [24] Fuhrmann, A.L. and Greimel, B. 2001. TEACHING IN VIRTUAL REALITY- CONCEPTS AND EVALUATION. Retrieved Jan 19, 2004, from [ht2 tp://www.cg.tuwien.ac.at/research/vr/studierstube](http://www.cg.tuwien.ac.at/research/vr/studierstube).
- [25] Furness, T., Winn, W. and Yu, R. 1997. The impact of three dimensional immersive virtual environments on modern pedagogy: Global change, VR, and learning. *Proceedings of Workshops* (1997).
- [26] Glenberg, A.M. 2008. Embodiment for education. *Handbook of cognitive science: An embodied approach*. (2008), 355–372.
- [27] Glenberg, A.M. and Kaschak, M.P. 2002. Grounding language in action. *Psychonomic bulletin & review*. 9, 3 (2002), 558–565.
- [28] Graham, R.L. and Yao, F.F. 1983. Finding the convex hull of a simple polygon. *Journal of Algorithms*. 4, 4 (1983), 324–331.
- [29] Greene, J.A. and Azevedo, R. 2009. A macro-level analysis of {SRL} processes and their relations to the acquisition of a sophisticated mental model of a complex system. *Contemporary Educational Psychology*. 34, 1 (2009), 18–29.
- [30] Harris, A., Rick, J., Bonnett, V., Yuill, N., Fleck, R., Marshall, P. and Rogers, Y. 2009. Around the table: are multiple-touch surfaces better than single-touch for children’s collaborative interactions? *Proceedings of the 9th international conference on Computer supported collaborative learning-Volume 1* (2009), 335–344.
- [31] Hilliges, O., Terrenghi, L., Boring, S., Kim, D., Richter, H. and Butz, A. 2007. Designing for collaborative creative problem solving. *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI conference on Creativity & cognition* (2007), 137–146.
- [32] Hinske, S. 2007. Determining the position and orientation of multi-tagged objects using RFID technology. *Pervasive Computing and Communications Workshops*,

2007. *PerCom Workshops' 07. Fifth Annual IEEE International Conference on* (2007), 377–381.
- [33] Hoof, M. van't and Swan, K. 2007. *Ubiquitous computing in education: Invisible technology, visible impact*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- [34] Hoshi, K., Öhberg, F. and Nyberg, A. 2011. Designing blended reality space: conceptual foundations and applications. *Proceedings of the 25th BCS Conference on Human-Computer Interaction* (2011), 217–226.
- [35] Ishii, H. 2007. *Tangible user interfaces*. CRC Press.
- [36] Ishii, H. and Ullmer, B. 1997. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Atlanta, Georgia, USA, 1997), 234–241.
- [37] Jetter, H.-C., Geyer, F., Schwarz, T. and Reiterer, H. 2012. Blended Interaction—Toward a Framework for the Design of Interactive Spaces. *Workshop DCIS* (2012).
- [38] Jin, X. and Han, J. 2010. Quality Threshold Clustering. *Encyclopedia of Machine Learning*. C. Sammut and G. Webb, eds. Springer US. 820–820.
- [39] Johnson, L. Smith Willis and Haywood 2011. The 2011 Horizon Report. *The New Media Consortium*. 1 (2011).
- [40] Johnson-Glenberg, M.C., Birchfield, D., Savvides, P. and Megowan-Romanowicz, C. 2011. Semi-virtual embodied learning-real world stem assessment. *Serious Educational Game Assessment*. Springer. 241–257.
- [41] Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M. and Kaltenbrunner, M. 2007. The reacTable: Exploring the Synergy Between Live Music Performance and Tabletop Tangible Interfaces. *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (Baton Rouge, Louisiana, 2007), 139–146.
- [42] Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M. and Kaltenbrunner, M. 2007. The reacTable: Exploring the Synergy Between Live Music Performance and Tabletop Tangible Interfaces. *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (Baton Rouge, Louisiana, 2007), 139–146.
- [43] Kaltenbrunner, M., Bovermann, T., Bencina, R. and Costanza, E. 2005. TUIO: A protocol for table-top tangible user interfaces. *Proc. of the The 6th Int'l Workshop on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation* (2005), 1–5.
- [44] Karakaya, A.F. and Demirkan, H. 2015. Collaborative digital environments to enhance the creativity of designers. *Computers in Human Behavior*. 42, (2015), 176–186.
- [45] Kaufmann, H. and Papp, M. 2006. Learning objects for education with augmented reality. *Proceedings of EDEN*. (2006), 160–165.
- [46] Kaufmann, H. and Schmalstieg, D. 2003. Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. *Computers & Graphics*. 27, 3 (2003), 339–345.
- [47] Kay, A.C. 1972. A Personal Computer for Children of All Ages. *In Proceedings of the ACM National Conference* (1972).
- [48] Kim, K., Lepetit, V. and Woo, W. 2010. Scalable real-time planar targets tracking for digilog books. *The Visual Computer*. 26, 6-8 (2010), 1145–1154.
- [49] Kolb, D.A. 2014. *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Pearson Education.
- [50] Levin, D. and Arafeh, S. 2002. The digital disconnect: The widening gap between Internet-savvy students and their schools. (2002).

- [51] Liarokapis, F. and Anderson, E.F. 2010. Using augmented reality as a medium to assist teaching in higher education. (2010).
- [52] Likert, R. 1932. A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*. (1932).
- [53] Marshall, P. 2007. Do tangible interfaces enhance learning? *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction* (2007), 163–170.
- [54] Martinez, R., Kay, J. and Yacef, K. 2011. *Visualisations for longitudinal participation, contribution and progress of a collaborative task at the tabletop*. School of Information Technologies, University of Sydney.
- [55] Martinez-Maldonado, R., Dimitriadis, Y., Kay, J., Yacef, K. and Edbauer, M.-T. 2013. MTClassroom and MTDashboard: supporting analysis of teacher attention in an orchestrated multi-tabletop classroom. *Proc. CSCL2013*. (2013), 119–128.
- [56] Martinez-Maldonado, R., Yacef, K. and Kay, J. 2013. Data Mining in the Classroom: Discovering Groups' Strategies at a Multi-tabletop Environment. *Educational Data Mining 2013* (2013).
- [57] Martín-Gutiérrez, J., Saorín, J.L., Contero, M., Alcañiz, M., Pérez-López, D.C. and Ortega, M. 2010. Design and validation of an augmented book for spatial abilities development in engineering students. *Computers & Graphics*. 34, 1 (2010), 77–91.
- [58] Matas, J., Galambos, C. and Kittler, J. 2000. Robust detection of lines using the progressive probabilistic hough transform. *Computer Vision and Image Understanding*. 78, 1 (2000), 119–137.
- [59] Moré, J.J. 1978. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. *Numerical Analysis*. G.A. Watson, ed. Springer Berlin Heidelberg. 105–116.
- [60] Müller-Tomfelde, C. 2010. *Tabletops-Horizontal Interactive Displays: Horizontal Interactive Displays*. Springer Science & Business Media.
- [61] Novak, J.D. and Cañas, A.J. 2008. The theory underlying concept maps and how to construct and use them. (2008).
- [62] Novak, J.D. and Gowin, D.B. 1984. *Learning How to Learn*. Cambridge University Press.
- [63] Novak, J.D. and Musonda, D. 1991. A twelve-year longitudinal study of science concept learning. *American Educational Research Journal*. 28, 1 (1991), 117–153.
- [64] O'Malley, C. and Fraser, D.S. 2004. Literature review in learning with tangible technologies. (2004).
- [65] Osberg, K.M. 1997. *Constructivism in practice: The case for meaning-making in the virtual world*.
- [66] Panitz, T. 1999. Collaborative versus Cooperative Learning: A Comparison of the Two Concepts Which Will Help Us Understand the Underlying Nature of Interactive Learning. (1999).
- [67] Park, B., Moreno, R., Seufert, T. and Brünken, R. 2011. Does cognitive load moderate the seductive details effect? A multimedia study. *Computers in Human Behavior*. 27, 1 (2011), 5–10.
- [68] Patten, J., Recht, B. and Ishii, H. 2006. Interaction techniques for musical performance with tabletop tangible interfaces. *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology* (2006), 27.

- 
- [69] Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M.A. and Chatterjee, S. 2007. A design science research methodology for information systems research. *Journal of management information systems*. 24, 3 (2007), 45–77.
- [70] Pemberton, L. and Winter, M. 2009. Collaborative augmented reality in schools. *Proceedings of the 9th international conference on Computer supported collaborative learning-Volume 2* (2009), 109–111.
- [71] Perkins, D. 1999. The many faces of constructivism. *Educational Leadership*. 53, 7 (1999), 6–11.
- [72] Pintaric, T. 2003. An adaptive thresholding algorithm for the augmented reality toolkit. *Augmented Reality Toolkit Workshop, 2003. IEEE International* (2003), 71.
- [73] Piper, A.M., O'Brien, E., Morris, M.R. and Winograd, T. 2006. SIDES: a cooperative tabletop computer game for social skills development. *Proceedings of the 2006 20th anniversary conference on Computer supported cooperative work* (2006), 1–10.
- [74] Preszler, R. 2004. Cooperative Concept Mapping: Improving Performance in Undergraduate Biology. *Journal of College Science Teaching*. 33, 6 (2004), 30–35.
- [75] Pulvermuller, F. 2005. Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*. 6, 7 (2005), 576–582.
- [76] Race, P. 2001. *A briefing on self, peer & group assessment*. Learning and Teaching Support Network York.
- [77] Resnick, M., Martin, F., Berg, R., Borovoy, R., Colella, V., Kramer, K. and Silverman, B. 1998. Digital Manipulatives: New Toys to Think with. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Los Angeles, California, USA, 1998), 281–287.
- [78] Roussos, M., Johnson, A., Moher, T., Leigh, J., Vasilakis, C. and Barnes, C. 1999. Learning and Building Together in an Immersive Virtual World. *Presence*. 8, (1999), 247–263.
- [79] Roussos, M., Johnson, A.E., Leigh, J., Vasilakis, C.A., Barnes, C.R. and Moher, T.G. 1997. NICE: combining constructionism, narrative and collaboration in a virtual learning environment. *COMPUTER GRAPHICS-NEW YORK-ASSOCIATION FOR COMPUTING MACHINERY-*. 31, (1997), 62–63.
- [80] Ryan, R.M. and Deci, E.L. 2000. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American psychologist*. 55, 1 (2000), 68.
- [81] Salvador, G., Bano, M., Contero, M. and Camba, J. 2014. Evaluation of a distributed collaborative workspace as a creativity tool in the context of design education. *Frontiers in Education Conference (FIE), 2014 IEEE* (Oct. 2014), 1–7.
- [82] Salvador, G., Bano, M., Pérez-López, D. and Contero, M. 2013. A Distributed Collaborative Learning Tool Based on a Conceptual Map Paradigm and Natural Interfaces Applied to the Case of Product Design Studies. *Research in Engineering Education Symposium (REES 2013)*, (2013).
- [83] Salvador, G., Pérez, D., Ortega, M., Soto, E., Alcañiz, M. and Contero, M. 2012. Evaluation of an augmented reality enhanced tabletop system as a collaborative learning tool: A case study on mathematics at the primary school. (2012).
- [84] Salvador-Herranz, G., Bano, M., Contero, M. and Camba, J. 2014. A collaborative design graphical tool based on Interactive Spaces and Natural Interfaces: A case



- study on an international design project. *Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on* (May. 2014), 510–515.
- [85] Salvador-Herranz, G., Contero, M. and Camba, J. 2014. Use of Tangible Marks with Optical Frame Interactive Surfaces in Collaborative Design Scenarios Based on Blended Spaces. *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*. Springer. 253–260.
- [86] Salvador-Herranz, G., Contero, M. and Dorribo-Camba, J. 2013. Management of distributed collaborative learning environments based on a concept map paradigm and natural interfaces. *Frontiers in Education Conference, 2013 IEEE* (2013), 1486–1491.
- [87] Salvador-Herranz, G., Perez-Lopez, D., Ortega, M., Soto, E., Alcaniz, M. and Contero, M. 2013. Manipulating Virtual Objects with your hands: A case study on applying Desktop Augmented Reality at the Primary School. *System Sciences (HICSS), 2013 46th Hawaii International Conference on* (2013), 31–39.
- [88] Salvador-Herranz, G., Perez-Lopez, D., Ortega, M., Soto, E., Alcaniz, M. and Contero, M. 2011. Tabletops for Collaborative Learning: A Case Study on Geometry Learning at the Primary School. *CSCL 2011 Conference Proceedings*. 2, (2011), 841–845.
- [89] Scardamalia, M. and Bereiter, C. 2006. Knowledge Building: Theory, Pedagogy, and Technology. *Cambridge Handbook of the Learning Sciences*. K. Sawyer, ed. Harvard University Press. 97–119.
- [90] Schöning, J., Hook, J., Bartindale, T., Schmidt, D., Oliver, P., Ehtler, F., Motamedi, N., Brandl, P. and Zadow, U. von 2010. Building interactive multi-touch surfaces. *Tabletops-Horizontal Interactive Displays*. Springer. 27–49.
- [91] Seo, J., Kim, N. and Kim, G.J. 2006. Designing interactions for augmented reality based educational contents. *Technologies for E-Learning and Digital Entertainment*. Springer. 1188–1197.
- [92] Shaffer, D.W., Squire, K.R., Halverson, R. and Gee, J.P. 2004. Video Games and the Future of Learning. University of Wisconsin-Madison.
- [93] Shepard, R.N. and Cooper, L.A. 1986. *Mental images and their transformations*. The MIT Press.
- [94] Shepard, R.N. and Metzler, J. 1971. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*. 171, (1971), 701–703.
- [95] Slavin, R.E. 1980. Cooperative learning. *Review of educational research*. 50, 2 (1980), 315–342.
- [96] Tam, M. 2000. Constructivism, Instructional Design, and Technology: Implications for Transforming Distance Learning. *Educational Technology & Society*. 3, 2 (2000), 50–60.
- [97] Tanner, D. 1997. Total creativity in business and industry. *Advanced Practical Thinking Inc (September)*. (1997).
- [98] Taxen, G. and Naeve, A. 2001. CyberMath: A System for Exploring Open Issues in VR-based Education. (2001).
- [99] Tse, E., Greenberg, S., Shen, C., Forlines, C. and Kodama, R. 2008. Exploring true multi-user multimodal interaction over a digital table. *Proceedings of the 7th ACM conference on Designing interactive systems* (2008), 109–118.

- 
- [100] Veltkamp, R.C. 2001. Shape matching: Similarity measures and algorithms. *Shape Modeling and Applications, SMI 2001 International Conference on*. (2001), 188–197.
- [101] Wagner, D., Reitmayr, G., Mulloni, A., Drummond, T. and Schmalstieg, D. 2010. Real-time detection and tracking for augmented reality on mobile phones. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*. 16, 3 (2010), 355–368.
- [102] Watson, J. 1991. Cooperative Learning and Computers: One Way to Address Student Differences. *Computing Teacher*. 18, 4 (1991).
- [103] Weiser, M. 1991. The computer for the 21st century. *Scientific american*. 265, 3 (1991), 94–104.
- [104] Wilson, M. 2001. Perceiving imitable stimuli: Consequences of isomorphism between input and output. *Psychological Bulletin*. 127, 4 (2001), 543.
- [105] Woods, E., Billinghamurst, M., Looser, J., Aldridge, G., Brown, D., Garrie, B. and Nelles, C. 2004. Augmenting the Science Centre and Museum Experience. *Proceedings of the 2Nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia* (Singapore, 2004), 230–236.
- [106] Zhang, Z. 2000. A flexible new technique for camera calibration. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 22, 11 (2000), 1330–1334.
- [107] Zuckerman, O., Arida, S. and Resnick, M. 2005. Extending tangible interfaces for education: digital montessori-inspired manipulatives. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (2005), 859–868.