ACE 19

Electronic offprint

Separata electrónica

LA CIUDAD COMO AULA DIGITAL. ENSEÑANDO URBANISMO Y ARQUITECTURA MEDIANTE MOBILE LEARNING Y LA REALIDAD AUMENTADA. UN ESTUDIO DE VIABILIDAD Y DE CASO

ERNESTO REDONDO DOMÍNGUEZ, ALBERT SÁNCHEZ RIERA, JOAQUIM
NARCÍS MOYA SALA Y JOAQUIM REGOT MARIMON

ACE: Architecture, City and Environment = Arquitectura, Ciudad y
Entorno [en línea]. 2012, Año 7, núm. 19 Junio. P. 27-54

ISSN: [1886-4805](https://doi.org/10.18866/1886-4805)

Website access: http://www-cpsv.upc.es/ace/Articles_n19/articles_pdf/ACE_19_SA_11.pdf

UPCommons Access: <http://hdl.handle.net/2099/123434>

ACE

Architecture, City, and Environment
Arquitectura, Ciudad y Entorno

C

THE CITY AS A DIGITAL CLASSROOM. TEACHING URBANISM AND ARCHITECTURE THROUGH MOBILE LEARNING AND AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES. FEASIBILITY AND STUDY CASE

Key words: Educational research, augmented reality, mobile learning, architectural representation.

Abstract

Our primary goal in this paper is to evaluate how the new Information Technology and Communication are incorporated into the educational processes, adding motivation, flexibility and mobility. We've first carried out an architectural feasibility study, where we have defined methodologies and resources, and then we've performed a case of study with students from Building Engineering of the Barcelona Tech University, where we've tested the academic performance and computer competences improvement in an urban environment. We've used for that virtual modeling, augmented reality and mobile learning technologies. In this second case, we have defined an experimental group of students and the parameters to be evaluated. Questionnaires were used to assess the degree of satisfaction and the ease of use of the technology. Our findings show that these technology, with a high usability rate, increase academic performance, and the speed and agility in the acquisition of knowledge, expanding student's graphical skills.

LA CIUDAD COMO AULA DIGITAL. ENSEÑANDO URBANISMO Y ARQUITECTURA MEDIANTE *MOBILE LEARNING* Y LA REALIDAD AUMENTADA. UN ESTUDIO DE VIABILIDAD Y DE CASO

REDONDO DOMINGUEZ, Ernest¹

SANCHEZ RIERA, Albert

MOYA SALA, Joaquim Narcís

REGOT MARIMON, Joaquim

Remisión inicial: 30-11-2011

Remisión definitiva: 5-2-2012

Palabras clave: Investigación educativa, realidad aumentada, *mobile learning*, representación arquitectónica.

Resumen

El objetivo principal en este artículo es evaluar como las nuevas Tecnologías de la Información y Comunicación se incorporan en los procesos educativos, añadiendo motivación, agilidad y movilidad. Primero en un estudio de viabilidad en una materia de Arquitectura, donde se han definido las metodologías y recursos necesarios, para luego en un estudio de caso con estudiantes de Ingeniería de la Edificación de la Universidad Politécnica de Cataluña, ensayar la mejora del rendimiento académico y las competencias informáticas en un entorno urbano usando el modelado virtual, la realidad aumentada y el *mobile learning*. En este segundo ensayo se ha definido un grupo experimental de estudiantes y los parámetros a evaluar por medio de cuestionarios, tales como el grado de satisfacción y la facilidad de uso de la tecnología empleada. Las conclusiones demuestran que estas tecnologías, con una tasa de usabilidad muy alta, incrementan el rendimiento académico, la rapidez y agilidad en la adquisición de conocimiento y amplían las competencias gráficas.

1. Introducción e ideas básicas

Se presenta una investigación sobre la mejora de las capacidades gráficas de nuestros estudiantes, en tanto que usuarios habituales de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), para incrementar su rendimiento académico al incorporarlas en su proceso de aprendizaje. Nuestro objetivo general es evaluar en un curso de Arquitectura o Ingeniería de la Edificación, si se cumplen nuestras hipótesis, utilizando para ello diversas tecnologías tales como la Modelización Virtual (en adelante, MV) y la Realidad Aumentada (en adelante, RA) en sus versiones más asequibles, trabajando con ordenadores portátiles y

¹ **Ernest Redondo Domínguez:** Dept. Expresión Gráfica Arquitectónica - I, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Avda. Diagonal, 649, CP 08028, Barcelona, Tel. 0034934016384, España. Email de contacto: enesto.redondo@upc.edu

teléfonos móviles, lo que se conoce como *Mobile Learning* o *mLearning* (en adelante, ML) en un entorno urbano o, por reducción, espacios exteriores.

Para ello vamos a evaluar primero su viabilidad en la implementación docente hipotética de un curso de grado de Arquitectura de Análisis de Formas, Historia del Arte o Urbanismo. Como tema desarrollaremos la arquitectura y el urbanismo romano en diferentes épocas y nos centraremos en un ejemplo, la antigua Gerunda, actual Girona, abordando la reconstrucción virtual de una parte de ella con las TIC y dentro de ella, como caso piloto, el que fuera su edificio más característico, la Torre Gironella, fortificación que presidía la ciudad cuya tipología defensiva se repite en otros lugares de ésta. (ver Figura 1). El rigor en la reconstrucción lo aporta el Instituto de Recerca Històrica (en adelante, IRH) de la Universidad de Girona, que ha facilitado los datos arqueológicos y la validación de las propuestas mediante un convenio de colaboración educativa.

Figura 1. Emplazamiento de la Torre Gironella. Cartografía histórica de referencia (1659, 1667, 1790). Imágenes de los Sitios de 1808-1810, donde la Torre fue el último reducto de resistencia

Fuente: E. Redondo. Web Ajuntament Girona. Girona en Catalogne. Sieur de Beaulieu. Cartoteca. Institut Cartogràfic de Catalunya. 2007. Plano de la ciudad de Gerona. Aprox. 1659. Atlas Girona Ciutat. S. XVII-XX. Vol. I Castells, R. Catllar, B. Riera, J. COAC, Demarcación Girona, Ajunt. Girona. 1992. de Girona vol I COAC. Pinturas de J. Martí Alsina, 1863.

Seguidamente se ha estudiado un ejemplo de aplicación a un curso de representación Arquitectónica en la Ingeniería a propósito de la ampliación del edificio de la Escuela Universitaria Superior de Ingeniería de la Edificación (en adelante, EPSEB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (en adelante, UPC), conformando un caso de estudio de investigación educativa sobre la base de un proyecto real del que se dispone de toda la documentación. Concretamente se ha trabajado en el nuevo campus de excelencia *Barcelona Knowledge Campus* (en adelante, BKC), (ver Figura 2) que prevé edificar un nuevo edificio en la Zona Universitaria dedicado a los estudios de Postgrado y Máster del Área de Arquitectura, Urbanismo y Edificación junto con la EPSEB.

Figura 2. Planimetría, ordenación general, imágenes de referencia y diferentes planos del proyecto de nuevo edificio y de la ampliación de la EPSEB Barcelona UPC

Fuente: UPC, E. Roca, L. Alegre.

La lógica de este proceso parte del convencimiento que todo experimento educativo que implique nuevas tecnologías, antes de convertirse en un curso lectivo y con él realizar un estudio de caso, precisa de un trabajo previo de planificación y adecuación de los contenidos y procesos docentes a emplear. Tras lo cual se procede a desarrollar el caso propiamente dicho, definiendo para ello un grupo experimental y si es factible otro de control con alumnos del mismo nivel, parametrizando los resultados del rendimiento académico, la valoración de los profesores, el grado de satisfacción de los alumnos, así como la usabilidad de la tecnología empleada sobre netbooks y teléfonos, Iphone y Android. En el estudio actual no está definido el grupo de control, aspecto que solucionaremos durante el próximo semestre. Por el momento ensayos equivalentes con otras TIC's (Bilén et al., 2008; Gallego et al., 2009), avalan que el uso de las mismas incrementa mucho el rendimiento académico de los alumnos. El problema a resolver es como hacer llegar estas nuevas tecnologías a la docencia de forma óptima.

En este sentido, la RA es una tecnología muy reciente que se basa fundamentalmente en la superposición de información en formato video a un objeto o un entorno real, de manera que mediante la selección y un correcto registro de imágenes sea posible añadir capas de información a la realidad de un objeto, un emplazamiento o un paisaje vistos a través de un dispositivo de imagen, con el objetivo de explicar una intención, una hipótesis o explicar un hecho dotándolo de mayor veracidad, en tanto que el usuario percibe esta información en el mismo lugar en que se encuentra.

En el campo del patrimonio histórico, motivo del estudio de viabilidad, permite mostrar una realidad *completada* generando una imagen imposible de lo que no existe, fruto de las investigaciones e hipótesis de los científicos, superpuesta al entorno real, permitiendo su verificación en el mismo lugar, promoviendo finalmente un mayor conocimiento del bien tutelado, formando así parte de los procesos de documentación, divulgación y recuperación del patrimonio histórico.

En el segundo caso se comparten las opciones de visualización pero se pretende evaluar el impacto visual previo a la construcción del edificio y obrar en consecuencia para producir los ajustes necesarios, trabajando siempre en ambientes exteriores sobre dispositivos informáticos móviles, teléfonos u ordenadores portátiles, que han de disponer de conexión a Internet para gestionar o adquirir datos y un dispositivo de captación de imagen en video. Al realizar ambos

experimentos docentes fuera del aula con dispositivos TIC's, interactuando alumnos con docentes, estamos usando una nueva metodología educativa, el ML.

Desde el punto de vista conceptual, la idea de proporcionar datos adicionales a un entorno real ni es novedosa ni surge con los sistemas digitales actuales de realidad aumentada. Claro ejemplo de ello supone el fotomontaje arquitectónico, de larga tradición arquitectónica durante todo el siglo XX. Y si bien es cierto que la realidad puede *aumentarse* de muchas formas (no exclusivamente mediante la tecnología ni de forma puramente visual), el término de *realidad aumentada*, aparecido con cierta frecuencia en los primeros años de la década de los 90, siempre aparece ligado a la utilización de unas determinadas técnicas y procesos digitales, y es al uso de esta tecnología móvil a la que nos referiremos al hablar de RA y ML.

El problema fundamental es que ante la avalancha de nuevas TIC's multimedia, siempre atractivas a los ojos de nuestros alumnos, no siempre es posible destilarlas adecuadamente e implicarlas en los procesos docentes. Jugando con esa afinidad y con su versatilidad, potencia gráfica y entorno participativo, se quiere ensayar un nuevo tipo de docencia dinámica, mejorando, en este caso, su rendimiento académico y competencias informáticas, a la vez que se les instruye y fomenta su preocupación e interés por salvaguardar el patrimonio arquitectónico y la evaluación del impacto visual de las nuevas construcciones.

Se han utilizado para ello aplicaciones informáticas de RA libres o *low cost*, como *Ar-media*², *BuildAr*³, *Mister Planet* o *Planet RV*⁴ y *Junaio*⁵. Los modelos virtuales se han generado también sobre plataformas gratuitas como *SketchUp* o con licencia educacional como 3DStudioMax y se han representado en dispositivos móviles del tipo *Netbook*, *UMPC* y especialmente en teléfonos y *tablets* de última generación.

La vertiginosa mejora de prestaciones de éstos últimos, dotados con cámaras cada vez más sensibles, con procesadores más rápidos que permiten manejar rutinas de procesamiento de imágenes 3d mas complejas, así como la incorporación de acelerómetros, brújulas, giroscopios, y sistemas de posicionamiento y localización, han convertido a estos dispositivos en herramientas muy útiles para la educación fuera del aula y para el uso de la tecnología de realidad aumentada, tradicionalmente ligada a dispositivos tipo Cascos (*Head Mounted Displays*, en adelante HMD), sistemas inmersivos muy costosos.

2. Base teórica y estado de la cuestión

2.1 Sobre Gerunda

La histórica ciudad romana de Gerunda, actual Girona, se sitúa en la ladera de una montaña cuyo declive finaliza en el Río Onyar en la confluencia con tres ríos más, el Ter, el Güell y el Galligans, ocupando una situación estratégica durante muchos años hasta la era moderna. El núcleo de la ciudad era atravesado de Norte a Sur por el camino de Heracles o Hércules,

² Ar-Media SketchUp y 3DS plugin. Más información en <http://www.inglobetechnologies.com/en/>.

³ BuildAr 3DS plugin. Más información en <http://buildar.com/>.

⁴ Plugin para 3DStudio. Más información en <http://planet.urv.es/planetrv/>.

⁵ Software AR para Android y Iphone. Más información en <http://www.junaio.com/>.

posteriormente denominado la Vía Augusta romana y actual calle de la Força y parte inferior de la escalinata de la Catedral (ver Figura 3). De la evolución de la muralla que protegía el recinto en los siguientes siglos, desde la época bajo Imperial hasta la Republicana (del s.I a.C al s.III d.C), han perdurado grandes lienzos, visibles por ejemplo en la Plaza de les Aligues, Plaza de Sant Domenech, calle de la Escuela Pia, Casa Pastors y Portal de Sobreportes, integrados dentro de la muralla medieval que reaprovecha el antiguo recinto romano (ver Figura 4).

Figura 3. Plano del casco antiguo de Girona con las trazas en negro de la muralla romana. Planta de Gerunda y del enclave de la torre Gironella

Fuente: J.M^a. Nolla y Aj. Girona.

Figura 4. Diversos restos localizados de la muralla. Puerta de Sobreportes, sobre la antigua Vía Augusta

Fuente J.M^a. Nolla. E. Redondo. A. Sanchez

Los primeros documentos planimétricos del conjunto fueron realizados a principios del siglo XX por Rahola (en 1929) y Bosch Gimpera (en 1919), este último centrado en las murallas a los que siguieron otros de Serra-Rafols entre 1942 y 1968. A este autor le debemos la descripción más completa realizada hasta la fecha del recinto tardorromano. En paralelo se llevaron a cabo diversas excavaciones arqueológicas en la zona de la Caserna d'Alemanys, justo por debajo de la Torre Gironella. Posteriormente recogidas por Nolla (1977) quien realizó su tesis doctoral sobre el tema de Gerunda y ha continuado dirigiendo los estudios y campañas arqueológicas en la zona como catedrático del IRH dando lugar a la mejor bibliografía de referencia sobre el tema en concreto (Canal et al., 2007).

Por todo ello se puede deducir que el primer recinto amurallado era muy pequeño y tenía una forma triangular, una excepción en la traza de las ciudades romanas debido a la especial

orografía del lugar y a su interés estratégico, presidido en su punto más alto que se localiza en el lado oriental, la Torre Gironella. Las pendientes del lado Nororiental, abierto hacia el barranco del Galligans, son muy pronunciadas, mientras la colina desciende suavemente en dirección al río Oñar a lo largo de aproximadamente 1 km. Paralelo a este límite, hacia el interior discurría el Cardo, actual calle la Força, que en su extremo Norte se abría con las puertas de Sobreportes, que aún se conservan, y por el Sur con las desaparecidas puertas del Correu Vell. Los últimos descubrimientos arqueológicos han puesto de manifiesto que las primeras murallas fueron levantadas en las primeras décadas del siglo I aC; *Gerunda* fue una ciudad fundada en un lugar donde no existía ningún otro asentamiento, estableciéndose su fecha de fundación dentro de las tres primeras décadas del siglo I aC (del 80 al 70 aC) con el objetivo de controlar la Vía *Heráclea*, que discurría por el corredor natural pre-litoral catalán pasando por *Baetulo* (Badalona), *Barcino* (Barcelona) y *Tarraco* (Tarragona).

Las defensas de esta muralla fundacional, en la zona próxima a la torre, presentan una estructura compuesta de grandes bloques de piedra (3,00x1,50 metros) puestos en seco y de forma irregular de manera que encajen unas con otras y sobre las cuales se construye propiamente el *opus quadratum* característico del periodo Republicano hasta siglo III dC, con la voluntad de aparentar mayor prestancia. En el caso de la Torre Gironella, la base es de *Opus incertum*. Este tipo de ejecución superpuesta se encuentra también en la muralla de *Tarraco*, *Baetulo* o Empurias (Fernández y Morillo, 1991). Bajo la Torre Gironella se encuentran restos de una gran torre cuadrangular romana, de unos nueve metros de lado y de siete a ocho metros de altura, que se corresponde con las características antes citadas. Este reducto evolucionó a lo largo de los siglos para convertirse en el castillo de Gironella (800 dC), durante siglos baluarte defensivo que acogió a los defensores en los diferentes sitios que ha sufrido la ciudad, siendo la torre de defensa más alta del país con sus 32 metros, que fue volada por los franceses en 1814. Por todo ello y dado que ha permanecido hasta nuestros días y se encuentra perfectamente localizada, pero apenas es visible, salvo por algunos fragmentos en diferentes puntos de la ciudad, es por lo que nos parece adecuado utilizarla en nuestro ensayo educativo.

2.2 Sobre modelos virtuales de ciudades romanas

Una primera aproximación al tema es, la de comparar *Gerunda* con otras fundaciones defensivas romanas contemporáneas; la mayoría hay que buscarlas en las fronteras o limes del imperio. Así podríamos citar: el muro de Adriano (*Limes Britannicus*), el muro Antonino en Escocia, el sistema defensivo del *Limes Germanicus*, el de la frontera árabe cerca de Petra, el *Limes Tripolitanus* en Libia, el Muro Trajano en Bessarabia y Dobrudja en Rumanía, el *Limes Alutanus* (también en Rumanía) o el *Limes Moesiae*, en esa misma zona unido a la frontera con Moldavia; por citar los más documentados. Estos enclaves han sido objeto de diversos estudios, reconstrucciones y modelos virtuales y pueden ser la base para nuestra interpretación analizando la obra de diferentes autores (Gebert, 1910 e Isaac, 1992) como tratadistas generales y especialistas en estos temas en concreto (Graf, 1995 y Gregory, 1990). De algunos de estos enclaves se han realizado reconstrucciones físicas, principalmente en el *Limes Germanicus*, con los ejemplos de Rainau, Welzheim, Sallburg y Rapsak. En la parte superior de la Figura 5 se recogen una muestra de información empleada: Base de la columna Trajana, Roma. Muro Adriano, Inglaterra. Reconstrucción de Colonia en el Limes. Alemania.

Figura 5. Información para la reconstrucción virtual. Modelos de referencia

Fuentes: E. Redondo y. Webs: León romano (<http://www.leon.es/leonromano/>), Colonia (<http://www.spiegel.de/fotostrecke/fotostrecke-36111.html>), Rome Reborn (<http://www.romereborn.virginia.edu/>).

Por lo que respecta al estado actual del uso de las nuevas tecnologías TIC en la modelización virtual, estudio y evaluación del patrimonio arquitectónico, están cada vez más integradas (Gómez y Quirosa, 2008). A nivel de modelos urbanos del periodo romano en nuestro país destaca el Proyecto de León Ciudad Digital *León Romano*⁶, probablemente el más próximo a nuestra investigación. A nivel internacional el referente sería el Proyecto *Rome Reborn 2.0*⁷ encabezado por universidades de Virginia y California, empezado en año 1997 y en el que participan investigadores de más de seis universidades de prestigio mundial. Otro proyecto es el de la reconstrucción del campamento romano en Colonia, Alemania (2008). (ver Figura 5 parte inferior)

Todos ellos son proyectos de modelado tridimensional y renderizado que usan diversas estrategias pero que han de recurrir a grandes equipos informáticos para generar los resultados. La principal característica de todos estos proyectos es su envergadura, destinándose muchos recursos, pero están fundamentalmente dedicados a presentar información en diversos registros multimedia con un claro carácter divulgativo. La propuesta planteada es educativa y, en consecuencia, el análisis e interpretación de la documentación existente junto con el proceso de modelización virtual, su reconstrucción teórica y su visualización y evaluación in situ, la principal diferencia.

2.3 La realidad aumentada

La Realidad aumentada en el ámbito arquitectónico ya fue discutida por Redondo (2010) y es el ejemplo más evidente de la rapidez con que evolucionan las TIC. Definida como una variación de la Realidad Virtual, en la que el usuario ve el mundo real con objetos virtuales, superpuestos o mezclados, por lo tanto la realidad aumentada no sustituye al entorno real, lo utiliza como

⁶ Más información del proyecto en: <http://www.leon.es/leonromano/>.

⁷ Más información del proyecto en: <http://www.romereborn.virginia.edu/>.

fondo sincronizándose con él completándolo. El resultado es una imagen de un modelo 3D virtual que se muestra al usuario en la pantalla del ordenador o cualquier otro dispositivo de salida, tales como un proyector, una pizarra digital, mediante gafas especiales o un teléfono móvil 3G sobrepuesta a la imagen en video, tiempo real del entorno.

Esta tecnología de reciente implantación a nivel comercial y con muchas expectativas de futuro se ha ido introduciendo en diversos campos, permaneciendo prácticamente desconocida para otros. Entre los que ya se está empezando a utilizar, buscando entornos próximos a nuestra investigación, destacaríamos el de los montajes industriales y el mantenimiento de equipos complejos, en los que esta tecnología puede ayudar a un operario mostrando información sobre posiciones de piezas o conexiones de cableado de una determinada máquina, dejando de lado los manuales de instrucciones, así como en los procesos constructivos edificatorios y en el mantenimiento de infraestructuras.

Los fabricantes de aeronaves han sido pioneros en la incorporación de sistemas de RA en las tareas de fabricación y mantenimiento. Neumann y Cho (1996) realizaron una aplicación de este tipo para McDonnell-Douglas. En este mismo entorno está el proyecto de *Augmented Reality Maintenance and Repair* (Henderson y Feiner, 2007). En el campo de la Arqueología donde merced a esta tecnología se puede visitar cualquier campo o recinto arqueológico con ayuda de un teléfono móvil con cámara u ordenador personal y visionar la reconstrucción arqueológica, podemos citar los trabajos de Benko et al. (2004). A nivel nacional destacamos los trabajos de Peula et al. (2008) en el campo del patrimonio histórico urbano. En el campo de la Educación se han estudiado aplicaciones específicas para la enseñanza de las matemáticas y de la geometría (Kaufmann y Schmalstieg, 2002).

En el caso de la Arquitectura las últimas aportaciones son los trabajos de Sánchez y Borro, (2007), que han llevado a cabo diversos ensayos en la rehabilitación de edificios, utilizando dispositivos móviles para comprobar la apariencia final de la obra, pudiendo cambiar materiales, colores y texturas. En planificación urbanística, cabe citar el trabajo de Kato et al. (2003). A nuestro entender, el salto cualitativo y de difusión de esta tecnología ocurre ha sido cuando ha sido factible aplicarla desde los teléfonos móviles de última generación, provistos de cámaras de gran calidad y capacidad de procesamiento y conectividad merced a los trabajos de Wagner (2007) y su software y librerías *ARToolkitPlus*. Esto ha dado lugar a múltiples aplicaciones comerciales de RA que aparecen continuamente y que analizaremos más adelante. En su aplicación a la docencia universitaria en el campo de la Arquitectura y de la Ingeniería, el ejemplo más reciente documentado son los trabajos de Saorín et al. (2009) ya comentados. Aunque orientados a la docencia gráfica de Ingeniería, demuestran la viabilidad de la metodología y buenos resultados en la mejora del rendimiento académico.

2.4 El Mobile Learning

Mobile Learning, por su parte, es una de las recientes implementaciones docentes surgidas del auge de los dispositivos 3G. A nivel del público en general lo más conocido es el proyecto *Mobile Augmented Reality Applications* (en adelante, MARA) de Nokia, pero su desarrollo fue cancelado en 2007 por dificultades económicas y por la aparición de los nuevos teléfonos Google-Android con programación abierta, destacando para ellos el proyecto Layar en 2009,

primera aplicación de RA de uso generalista pendiente de implementarse en el ámbito educativo.

Ahora bien, centrándonos en la revisión de la producción científica específica, los primeros trabajos de ML a citar son los de Kristoffersen y Ljungberg (2000), que crearon *COMTEXT* como un entorno virtual para el aprendizaje usando dispositivos móviles. Lehner y Nosekabel (2002) extendieron esa misma idea a una universidad virtual basada en Internet y los dispositivos móviles mediante el desarrollo de una plataforma de *m-learning* llamada *Welcome (Wireless E-Learning)*. Esta misma competencia educativa ha sido reivindicada como básica por otros autores como Prahalad y Hamel (1990), por citar a los primeros en hacerlo. No se trataría por tanto de evaluar la docencia en un entorno de movilidad sino conceptual y de interacción social de los usuarios, como defienden Smørddal y Gregory (2003) en el ámbito de la docencia médica.

Estaríamos hablando de algo que está a caballo del *m-learning* y el *ubiquitous learning* por cuanto los datos a exponer. La transmisión de experiencias y la gestión se basa en una serie de nuevas tecnologías donde los datos se depositan en la nube y se consultan en cualquier lugar. Ogata y Yano (2003) han desarrollado software educativo específico para aplicaciones en este entorno usando *tweeter*, *facebook*, *dropbox*, etc. En esta revisión estaríamos pues hablando de diferentes tipos de estrategias de *m-learning*, como el pasear por una ciudad o un campus universitario completando esta experiencia sensorial con un proceso de aprendizaje ensayando diversas tecnologías y dispositivos, en la línea de los trabajos de Lyytinen y Yoo (2002). Otros estudios se han centrado en los SMS como sistema para interactuar los alumnos y el docente (Bollen et al., 2004). La evolución de la propuesta ha conducido a que Virvou y Alepis (2005) creasen un sistema de tutorías inteligentes sobre el mismo sistema.

No obstante ninguna usa la RA y es por el convencimiento de que esta tecnología, merced a los nuevos teléfonos 3G con pantallas táctiles de formato medio, va a tener gran impacto en la docencia, que se quiere evaluar su utilidad. El ML como experiencia docente en la formación de los arquitectos e ingenieros de la edificación, en el aprendizaje de la historia y el proyecto urbano, en la evaluación del impacto visual de los nuevos edificios, en la gestión y mantenimiento de los mismos implicando a los alumnos en un discurso participativo y donde la movilidad y la visita al lugar es imprescindible para su comprensión. Tradicionalmente esto se realizaba mediante apuntes de campo, fotomontajes, consultando planos, etc. Está por demostrar si estas estrategias son aplicables en una investigación educativa específica de la formación de los futuros arquitectos e ingenieros en el entorno de las TIC's. Ese es nuestro principal objetivo.

3. Estudio de Viabilidad. Metodología de generación y visualización del modelo

3.1 *Gerunda romana, documentación histórica y arqueológica*

Tras lo descrito anteriormente queda claro que este patrimonio urbano es interesante, muy desconocido y apenas visible, pues salvo algunos elementos como la traza de la muralla romana o el conjunto defensivo de la torre Gironella, del resto apenas se aprecian algunos fragmentos de mampostería romana en diferentes puntos de la ciudad de Girona. Esta dispersión territorial y su interés histórico, así como la necesidad de inculcar en nuestros estudiantes el respeto y la valoración del patrimonio arquitectónico, son la base de nuestro experimento docente en forma de estudio de viabilidad del uso de las TIC's y la RA, y el ML.

Las murallas romanas de la ciudad de Girona son uno de los monumentos menos conocidos de la misma y en contraposición a las recientemente restauradas murallas del siglo XVII su trazado, oculto bajo diversas fincas privadas, no ha presentado hasta hace poco un interés turístico. Por fortuna la reciente recuperación de los espacios tras el rectorado de la Universidad de Girona y la Plaça de Sant Domènec, junto con la inminente restauración de los jardines del antiguo colegio de los HH. Maristas y un nuevo ascensor público, pondrán al alcance del público lienzos fragmentarios de estas defensas. La posible protección y explotación de los mismos no puede pasar por su reconstrucción física y es en este contexto donde las nuevas tecnologías de la RA, unidas a los sistemas de telefonía móvil y ordenadores personales, los sistemas de información geográfica, etc., permiten nuevas estrategias de conservación y difusión de nuestro patrimonio cultural.

Concretamente, nos estaríamos centrando en la muralla del bajo imperio (s. II dC, entre los años 284 y 304), la cual fue una reforma de la anterior republicana, pero que no sufrió cambios en su trazado. De todos esos restos, los mejor documentados y que usaremos como referencia, se corresponden al levantamiento arqueológico de la zona de la torre-castillo Gironella llevado a cabo por los arqueólogos de la Universidad de Girona en el año 1987. Esta ha sido la información inicial facilitada por la institución que se ha ampliado con una segunda campaña de excavaciones a lo largo del año 2010 (ver Figura 6, izquierda), la cual ha redefinido el posible trazado de la muralla en el lado Este de la torre en contra de la versión inicial antes representada. Todo ello es muy importante para aportar rigor a nuestras hipótesis de partida por lo que respecta a la apariencia definitiva de la torre romana en ese periodo de su historia. En base a todo ello hemos procedido a generar los modelos virtuales.

Figura 6: Planos del estudio arqueológico de la torre, año 2011, de 1987

Fuente: Institut de Recerca Històrica, Universitat de Girona, E. Redondo.

3.2 El levantamiento del lugar y entorno con la tecnología del escáner láser

La primera toma de contacto con el lugar fue el levantamiento de todo el conjunto empleando la tecnología del escáner láser merced a la colaboración del Laboratorio de Modelización Virtual de la Ciudad (en adelante, LMVC) del Centro de Política de Suelo y Valoraciones (en adelante, CPSV) de la UPC. Debido a la extensión del mismo se procedió a un primer levantamiento de baja densidad, cuyo resultado es una nube de puntos que nos permite generar una primera imagen y modelo 3D general y la coordinación de las estaciones de toma de datos con el entorno siguiendo la metodología contrastada creada por el LMVC (Marambio, 2007). Sobre esta base de referencia general, en la que se observan las zonas de barrido ocultas a los pies del escáner en forma de círculos, hemos procedido a seleccionar las zonas de estudio de esta fase del proyecto, circunscribiéndonos a la torre Gironella romana que ocupa el lado Oeste del yacimiento, a la vez de proceder al escaneado del espacio interior y a referenciar sobre la nube de puntos las imágenes que toma la cámara fotográfica digital sincronizada con el escáner.

Con esta información se han generado diversas vistas 3D que han permitido la comprensión global del conjunto, tanto en su interior como en el exterior y obtener una primera información dimensional del mismo, aunque también es cierto que el exceso de datos que genera esta tecnología láser obliga a seleccionar o acotar mucho los puntos de referencia. Este levantamiento de baja densidad precisaría ser complementado con otro más detallado de las partes singulares de interés arqueológico, tales como los muros romanos originales, usando el mismo escáner *Riegl*, (ver Figura 7), pero por el momento estamos usando los datos globales como base de referencia para incorporar el entorno al modelo virtual y tener una referencia cartográfica general. La segunda consideración a hacer es que debido a que las nubes de puntos obtenidas presentan tamaños muy grandes, incluso a baja densidad (valores que superan los 4 Gbytes), ha sido imposible publicarlas, motivo por el cual nos decantamos por aislar del conjunto la zona de la torre Gironella romana, visible en las piedras rectangulares del patio exterior del monumento y en su interior.

Figura 7. Levantamiento del entorno inmediato de la torre mediante laser escáner, plano general y secciones principales

Fuente: E. Redondo, A. Marambio y J. Corso.

3.3 El levantamiento topográfico y la georeferenciación

Uno de los principales problemas que hay que solventar a la hora de gestionar diversas nubes de puntos es el de establecer puntos base fiables y de referencia para su posicionamiento cartográfico. Por ese motivo se procedió a definir una serie de 150 puntos, fácilmente identificables, de los cuales el Ayuntamiento de Girona facilitó su posicionamiento y cotas. Estos datos fueron sustituidos por los que se habían obtenido en el escáner y el resultado es el reposicionamiento y ensamblaje preciso de toda la nube con el conocimiento preciso de las coordenadas X, Y, Z de cada uno de los 20 millones de puntos tomados. El siguiente paso para la publicación de estos datos en un Sistema de Información Geográfica (en adelante, SIG) pasa por la conversión de estas coordenadas al sistema Universal Transverse Mercator (en adelante, UTM) en el que desaparece la coordenada Z. Para ello se debió proceder a su transformación en base a identificar 27 puntos clave del levantamiento, lo cual nos permitió detectar algunas imprecisiones de la cartografía de referencia oficial. En la Figura 8, parte superior se muestran los puntos de referencia topográficos para el ajuste y orientación final de las nubes de puntos y cartografía vectorial de referencia y en la parte inferior izquierda los modelos 3D de las piedras originales de la edificación bajo imperial localizadas en el yacimiento y georeferenciación de la documentación existente.

Figura 8. Puntos de referencia topográficos y modelos 3D.

Fuente: E.Redondo, Ajuntament de Girona (UMAT) y A. Sánchez.

El objetivo último de este proceso era disponer de datos fiables para poder referenciar cualquier documento disponible sobre una plataforma SIG, ya sea un plano, un modelo 3D, una foto, una referencia literaria, adscribiéndola a un punto o polígono concreto de esta base UTM. Este será el caso del SIG de cartografía histórica del Ayuntamiento de Girona, que en la zona en cuestión presenta un vacío importante de datos. A nivel docente estos datos nos han permitido visualizar y posicionar en el entorno *Google Earth* y *SketchUp* toda la información disponible con precisión, lo cual avala la viabilidad de nuestra estrategia de bajo coste y de interés educativo como se muestra en la Figura 8, parte inferior derecha.

3.4 La edición y mallado de la nube de puntos

De cara a la confección de una malla óptima fue necesario optimizar la nube de puntos antes de mallarla, de manera que las formas fueran reconocibles pero no pesadas a nivel digital. En la optimización de nubes de puntos se han usado varias técnicas basadas en la división del espacio en secciones (Rivest, 1974) adaptadas según las densidades y por medio de estructuras de celdas (Bentley et al., 1980 y Friedman et al., 1977). Estos métodos miden los límites de un conjunto de coordenadas espaciales y las separan en distintos grupos según varios criterios de modo que puedan simplificar la tarea de procesamiento y análisis de los mismos, especialmente en la detección de puntos cercanos. De cara a la generación del mallado casi siempre se empieza por calcular las normales (Zwicker et al., 2002 y Hoppe, 1992), de modo que luego se puedan agrupar en conjuntos para la detección de superficies.

Figura 9. **Primeros trabajos de edición y gestión de la nube de puntos con aplicaciones comerciales**

Fuente: E. Redondo y J. Corso.

Para poder construir una malla poligonal óptima fue necesario depurar la nube de puntos obtenida con el escáner láser, hasta dejar sólo aquellos que son imprescindibles para la correcta definición y percepción del modelo por parte del usuario como se muestra en la Figura 9. En este sentido, se usaron algoritmos de proximidad en los que se eliminaron todos aquellos puntos que sólo daban información redundante del modelo. Una vez simplificada la nube de puntos se vuelve mucho más tratable a nivel digital pudiéndose seguir depurando y optimizando hasta obtener un resultado óptimo. Debido a que las nubes de puntos son difíciles de interpretar cuando se observan en detalle, es imprescindible mallarlas para poder captar la volumetría real del conjunto. El siguiente paso será entonces construir una malla a partir de los puntos dados. Sin embargo, este proceso es complejo y requiere de la realización de varias pruebas antes de lograr un resultado definitivo.

El proceso de mallado ha usado un mecanismo basado en la generación de normales para cada vértice según la disposición de los puntos cercanos, hecho esto se han usado algoritmos capaces de generar conjuntos de puntos que pertenecen, dentro de un margen, al mismo plano al tener una normal similar. Una vez tenemos los conjuntos se procede mallarlos de tal forma que nos queden elementos reconocibles en los que se pueden observar incluso detalles como los bordes de la piedra o los defectos y las hendiduras de los muros.

En este proceso el color juega un papel importante por lo que la malla generada conserva para cada vértice el color original del punto, de tal forma que los elementos se vuelven aun más reconocibles. Aun que en un primer momento la optimización de la nube ayuda a su interpretación, cuando este proceso se repite varias veces perdemos detalle en el relieve, esto nos obliga a mantener un equilibrio entre el nivel de detalle y la capacidad de computación del hardware.

Figura 10. **Comparación entre distintos grados de depuración de la nube de puntos y la pérdida de detalle de la malla resultante mediante aplicación diseñada a tal efecto**

Fuente: J.N. Moya y J. Regot.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos se realizó un modelo virtual mallado del escaneo que cumpliera todas estas condiciones de optimización y detalle especificados, para que partiendo de él se pudiera generar y situar un modelo lo más cercano posible a la realidad histórica del mismo. Como los programas de modelado no admitían mallas excesivamente complejas se tuvo que depurar en gran medida la nube de puntos original hasta que la malla resultante fuera lo suficientemente liviana como para trabajar con comodidad, siguiendo un proceso similar al que podemos observar en la Figura 10. Seguidamente se procedió a la construcción de modelos virtuales simples correspondientes a distintas épocas y en base a la documentación aportada por el equipo de arqueólogos. Estos modelos se integraron con la malla poligonal del entorno.

3.5 Sobre que representar

Cuando nos planteamos el tipo de representación a emplear en este estudio pronto nos dimos cuenta que teníamos ante nosotros un amplio número de sistemas y modalidades. En general, hemos empleado modelos 3D dado que con ellos se puede representar mayor información y de forma más compacta, generando posteriormente vistas de los mismos. En segundo lugar, no queríamos dejar de lado ningún tipo de representación a priori, desde las puramente descriptivas hasta las más científicas, pasando por las realistas; todo ello unido al hecho de que su visualización debería poder realizarse desde múltiples puntos de vista, incluidos los cercanos. Un resumen de los modelos virtuales realizados se recoge en la Figura 11

A la postre, las capacidades gráficas de los dispositivos han sido los que han fijado la resolución y el nivel de detalle de los modelos a emplear en cada caso, procediendo entonces a simplificar los más complejos en los aspectos menos relevantes para el propósito de cada imagen.

Figura 11. Ensayos de visualización de diferentes reconstrucciones de la torre

Fuente: E. Redondo.

Un aspecto muy importante a la hora de dar credibilidad a los modelos virtuales, a parte de su definición volumétrica, ha sido el de la aplicación de texturas verosímiles y rigurosas. Para ello se ha tomado la documentación arqueológica e histórica estudiada recogidas en la Figura 12 y se ha reinterpretado, mediante dibujo digital, la apariencia de los muros de cerramiento de la torre en diferentes periodos de su historia. Un resumen de los modelos virtuales realizados se recoge en la Figura 11

Figura 12. Catas y documentación arqueológicas. Fotografías de los muros conservados. Texturas digitales y referencias históricas

Fuente: IRH, E. Redondo y grabados de Piranesi y A. Palladio.

La volumetría de la torre final mostrada en la Figura 13 toma como base la propuesta por el profesor Nolla (Pallahí y Nolla, 2007) en sus trabajos aunque, a la vista de las múltiples variantes documentadas así como las reconstrucciones recientes de colonias romanas citadas anteriormente quedan muchos aspectos por definir, tales como el tipo de cubierta, el posible espacio en la planta baja, incluso no está claro el material a nivel de primer piso en el caso de la torre bajoimperial.

Figura 13. **Información para la reconstrucción virtual de la torre sobre la base de los estudios del IRH**

Fuente: J. Sagrera y J. Nolla.

3.6. *Ensayos de aplicabilidad de la Realidad Aumentada en entornos interiores*

El primer ensayo de visualización se realizó en un ambiente interior con el objetivo de probar los diferentes programas, el tamaño de los ficheros y el número máximo de polígonos a visualizar con un equipo básico. Así se trabajó con *ArMedia* de *Inglobe Technologies* que dispone de un visor independiente *Ar Player*; con *BuidAr* de *NZLab*, que también dispone de un visor; y con *MrPlanet*. Esto permitió comprobar que nuestros modelos de RA pueden llegar a ocupar 2,5 Mb, teniendo más de 40.000 polígonos y con tamaños de hasta 16 Mb, sin excesivos problemas pudiendo disponer de un amplio abanico de posibilidades gráficas adecuadas a los diferentes destinatarios. Una muestra de los ensayos de visualización con diversas plataformas se recoge en la Figura 14; en la parte superior con AR-Media y abajo Buid-Ar y Junaio

Figura 14. Ensayos de visualización

Fuente: E. Redondo y A. Sanchez.

La conclusión a estos ensayos previos es que es perfectamente factible la visualización de los modelos creados tanto de la torre como del entorno y posicionarlos adecuadamente respecto a unas marcas, que se deberían ubicar a escala sobre el edificio en cuestión. Entre sus ventajas cabe destacar: la precisión alcanzada con el registro 3D (del orden del cm.); la peculiaridad de que los objetos generados por ordenador se pueden relacionar fácilmente con las marcas (permitiendo interfaces tangibles); la posibilidad de implementar elementos de interacción (a partir de distancias y rotaciones entre marcas); y la economía de los sistemas (ya que suelen disponer de licencia *GPL*⁸ y para el registro únicamente es necesaria una cámara Web). Sin embargo, también hay que tener en cuenta sus limitaciones que nos hemos encontrado, por ejemplo: la fuerte dependencia de las condiciones de luminosidad.

3.7 Ensayos en espacios exteriores

Los ensayos en espacios exteriores se realizaron en primer lugar mediante ordenadores portátiles y utilizando el mismo software que para espacios interiores. Como se observa en la Figura 15. Las limitaciones en la óptica de las cámaras utilizadas obligaron a tamaños del *tracker*, de un mínimo de 50x50 cm., para conseguir una cierta estabilidad del modelo virtual superpuesto en su entorno. Como conclusión preliminar cabría proponer que el registro de modelos virtuales basados en el reconocimiento óptico de patrones en espacios exteriores tiene fuertes limitaciones, como son la fuerte dependencia de las condiciones de luminosidad; la escala local de trabajo (relación distancia cámara con tamaño marcador), que obliga a que si se pretende superponer un modelo con un solo marcador, y a una cierta distancia, cosa habitual puesto que los edificios históricos suelen tener un tamaño considerable, éste debería tener un tamaño exageradamente grande; y, finalmente, el hecho de que el entorno físico se ve alterado por las marcas. Especialmente crítico en el caso del patrimonio cultural. Por el

⁸ *GPL (General Public License)* es la licencia creada por la *Free Software Foundation* en 1989 (la primera versión). Orientada principalmente a proteger la libre distribución, modificación y uso de software. Su propósito es declarar que el software cubierto por esta licencia es software libre y protegerlo de intentos de apropiación que restrinjan esas libertades a los usuarios.

contrario el modelo del entorno obtenido con el escáner láser ayuda mucho a ajustar con precisión el nuevo objeto en su posición definitiva.

Figura 15. **Ensayos de visualización sobre el lugar de estudio mediante ordenadores personales**

Fuente: E. Redondo.

Por todo ello se procedió seguidamente a investigar sobre el registro basado en reconocimiento de imágenes reales, que como mínimo en el caso del patrimonio permitirían no alterar el entorno visible. Para ello se impuso un cambio de estrategia ya que la única plataforma a nuestro alcance que permite, por el momento, tal tipo de aplicaciones, funciona sobre teléfonos móviles.

La visualización en un teléfono móvil *iphone*, como se muestra en la Figura 16, sin necesidad de trackers, obliga a disponer de una cuenta en el servidor *Junaio*, capturar previamente con el dispositivo las imágenes que han de servir de base y generar modelos 3D en formato MD2 de 2.000 polígonos, exportarlos desde *3DStudio* provistos de texturas en formato *png* de tamaño 512x512 píxeles y depositarlos en el servidor. La descarga se realiza mediante la conexión 3G, en el mismo lugar tras tomar una imagen de referencia.

Figura 16. Ensayos de visualización de la torre romana en un teléfono móvil *Iphone*.
En rojo los efectuados, en amarillo otros posibles

Fuente: E. Redondo y A. Sánchez.

3.8 Conclusiones preliminares

A la vista de todos estos ensayos y de las conclusiones extraídas en cada ensayo, queda claro que es factible realizar este tipo de experimento en un entorno educativo siempre que se disponga de la correspondiente cobertura de Internet y los consiguientes dispositivos móviles. En segundo lugar, a parte de las consideraciones de la falta de adecuación de estos dispositivos al trabajo en ambientes exteriores, pues salvo los *Ipad* no tienen suficiente contraste ni luminosidad sus pantallas, este hecho se puede aliviar sombreando la pantalla con una mano. Además, si se usan marcas fiduciarias, estas han de tener un tamaño considerable si el monumento a estudiar es muy grande y los dispositivos de captación han de ser de alta resolución, lo cual sólo es factible con las cámaras web HD. La conclusión a este apartado es que si se trabaja con *trakers* ha de ser a distancias por debajo de los 25 metros. En caso de precisar mayor ángulo de visión el registro ha de ser por imagen, lo cual precisa de unas condiciones de luz y observación acotadas. Por último, el tamaño y calidad de los ficheros manejables y sobre todo visualizables en cada dispositivo marca las diferencias. Esta característica ha sido estudiada (Fonseca et al., 2011) en función del tipo de pantalla y en un aspecto muy importante a la hora de plantear la visualización de documentos y registros constructivos en los ordenadores y teléfonos móviles, ya que hay que optimizar mucho su resolución y tamaño.

4. Estudio de caso

4.1 Metodología

A continuación se describe la experiencia docente realizada en el marco de la plataforma BEST BCN (Asociación de Estudiantes Europeos de Tecnología, que agrupa a estudiantes de más de 80 países) llevada a cabo por 25 alumnos internacionales provenientes de varias nacionalidades europeas que cursan estudios relacionados con arquitectura e ingeniería en la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (en adelante, EPSEB) en el periodo del 19 al 23 de Septiembre del 2011. Se pretendía evaluar el uso de la tecnología de RA y ML en los procesos de aprendizaje mediante la aplicación de una serie de herramientas

relacionadas con dicha tecnología. La experiencia se planteó a partir de una serie de ejercicios, donde el alumno debía ser capaz de transmitir a otros participantes un mayor conocimiento constructivo y técnico sobre el edificio en que trabaja. Debía, de algún modo, *completar* la información constructiva del espacio que lo rodeaba.

Se definió para ello un grupo experimental de alumnos compuesto por todos los participantes. La experiencia de carácter teórico-práctica se ha dividido en tres fases. En la primera de ellas se realizaron clases teóricas de formación sobre el contexto, la época y la tecnología a aplicar. Se impartieron los conceptos fundamentales sobre la tecnología, como sistemas de registro, renderizado, oclusión, inmersión lumínica, sistemas de seguimiento (*tracking*), etc.; y se mostraron ejemplos de las aplicaciones más comunes implantadas en diversos campos, con el fin de que el alumno fuera consciente de las posibilidades que el uso de esta tecnología le ofrecía. (ver Figura 17).

En la segunda, los alumnos realizaron dos ejercicios prácticos, uno en el aula y otro fuera de ella, utilizando patrones planos para el registro de los objetos o la identificación por imagen. (ver Figura 18). Todo ello con el fin de llegar a dominar las tecnologías de RA y ML a propósito de modelar pequeñas intervenciones en el interior del edificio existente, documentar sus instalaciones aplicando conocimientos ya adquiridos en su formación como arquitectos e ingenieros de la edificación o evaluar el impacto visual del nuevo edificio. Para ello han usado ordenadores personales provistos de cámaras web y, excepcionalmente, teléfonos móviles y un *Ipad*. Una vez entregados estos ejercicios, se ha hecho una primera evaluación.

Figura 17. **Ensayos de visualización de los modelos virtuales en el interior del edificio de la EPSEB en ordenadores portátiles y webcams**

Fuente A. Sanchez.

4.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del experimento han sido: desarrollar un proceso de investigación educativa y de nuevas metodologías docentes alternativas a las tradicionales, que aprovechando la atracción hacia las mismas de nuestros alumnos reviertan en una mayor eficiencia y mejora del rendimiento académico de los estudiantes. Facilitar el acceso de los futuros arquitectos e ingenieros de la edificación a las nuevas tecnologías, como por ejemplo o la realidad aumentada, muy adecuada para los estudios de impacto visual de los proyectos

sobre el propio emplazamiento, que apenas es conocida por el público en general y que en cierto modo podría considerarse como la evolución del tradicional fotomontaje arquitectónico.

Incorporar las tecnologías de bajo coste a la educación universitaria, merced a la generalización de los dispositivos móviles tipo ordenadores portátiles, *lpad's* o teléfonos móviles *Android* o *Iphone*, provistos de altas prestaciones gráficas y precios accesibles, así como las aplicaciones especializadas en RA y en modelado fotogramétrico a partir de imágenes, complementado con otras de diseño propio para la gestión de los datos. Desarrollar estrategias docentes que aprovechen estas circunstancias para plantear ejercicios docentes a distancia, ML, integrados en un entorno virtual en el que la transmisión de conocimientos y la interacción con el alumno se lleva a cabo fuera del aula y de forma dinámica. Por último, dotar de contenidos arquitectónicos a los experimentos tecnológicos llevados a cabo en la primera fase de estudio de viabilidad, aplicando esta estrategia en la formación de los futuros Ingenieros de la Edificación, como muestra que lo que hace adecuado una tecnología TIC en la docencia es su capacidad de incorporar y explicitar contenidos docentes interesantes de forma óptima. Además de evaluar la posibilidad de utilización de esta tecnología en ambientes interiores y exteriores, implicándola en procesos de construcción, rehabilitación y mantenimiento de la edificación. Con nuestra propuesta el alumno podrá recorrer la actual ciudad y en determinados puntos descubrir cómo era en la época romana, como eran sus edificios, participar en la discusión y comentario de los mismos, en grupo y en función de sus perfiles docentes, lo que se conoce como multicriterio y todo ello merced a los dispositivos móviles.

Figura 18. Ejemplos de resultados de visualización del nuevo proyecto mediante realidad aumentada en un *lpad* de la ampliación del EPSEB Barcelona UPC (Tercer ejercicio)

Fuente A. Sanchez y E. Redondo.

4.3 Análisis final de resultados

Finalmente, el alumno debía realizar una presentación donde debía constar una descripción de los distintos espacios *aumentados*, y que sirvió de mecanismo de comprobación de la eficacia de esta tecnología en procesos de aprendizaje. Paralelamente se han parametrizado, mediante un cuestionario específico, la valoración de los profesores sobre los ejercicios entregados en cada fase, el rendimiento académico, el grado de satisfacción de los alumnos, así como su opinión sobre la usabilidad de la tecnología empleada junto a autoevaluaciones de los alumnos sobre el interés y utilidad de los conocimientos adquiridos, el grado de satisfacción de la actividad realizada y los contenidos del curso.

Por el momento los datos recogidos y analizados confirman que la respuesta ha sido favorable en un 95% por parte de los estudiantes, aunque un 65% de ellos no disponían de teléfonos 3G, habiendo realizado los ensayos con ordenadores portátiles. Por lo que respecta al incremento del rendimiento académico, ya sea por el entusiasmo hacia la nueva tecnología o por el interés del tema, los trabajos han sido muy superiores en calidad a los de otros años. En cuanto a la usabilidad de los dispositivos, los ordenadores portátiles no se adaptan a los ambientes exteriores, con lo que el exceso de luminosidad ambiental dificulta mucho el manejo de la aplicación informática a pesar de su facilidad de uso. En el caso de los teléfonos, el reducido tamaño de la pantalla limita mucho el ámbito de visualización de los modelos y la manipulación de los mismos, lo cual va en detrimento de la aplicación. Este aspecto se superaba usando *Ipad2*.

Se obtuvieron un total de 17 respuestas. El cuestionario se dividió en tres apartados. En primer lugar se preguntaba sobre cuestiones personales: edad, género, nivel y tipo de formación, el nivel de conocimiento sobre el uso de varios programas, etc. En el segundo apartado se preguntaba sobre los contenidos y material del curso. Finalmente, se encuestaba sobre el uso y utilidad de la tecnología aprendida. En relación a la formación personal y el nivel de conocimiento previo sobre la tecnología cabe destacar que las aplicaciones más utilizadas y con mas nivel de conocimiento fueron *Email* e *internet browsers*, seguidas por aplicaciones de ofimática, CAD y de retoque fotográfico. El menor conocimiento resultó en sistemas *LINUX* y *AR* (escala: 0=nada, 3=advanced).

En relación a la opinión, contenidos docentes y material del curso, cabe indicar la elevada puntuación recibida en relación al material, representatividad y número de ejercicios, siendo la valoración final superior a 4 puntos sobre 5 en todas ellas. La pregunta sobre el grado de satisfacción del curso en relación al propósito para el que fue diseñado (mejora de habilidades espaciales) también resultó superior a 4 puntos (4,35). La pregunta menor valorada fue la que se refería a la posibilidad de aprender dichos contenidos de forma autónoma. Y en relación a la tecnología de realidad aumentada y el software utilizado, el 100% del alumnado la encontró útil en el campo de la arquitectura y la construcción, a pesar de no tener conocimientos previos sobre las aplicaciones utilizadas. La valoración global del curso fue de 4,18 puntos sobre 5. Lo cual da idea del grado de satisfacción alcanzado.

En un análisis de correlación entre la opinión global del curso y el resto de variables, se obtiene una alta correlación (0,69) con: la representatividad de los ejercicios y la calidad de la presentación. De manera son estas variables determinantes para el éxito de la experiencia

docente. No estando tan correlacionado con el hecho de haber sido capaz de resolver los ejercicios de forma autónoma ni con el número de ejercicios planteados. La mayor correlación (0,86), sin embargo, se encontró con el uso del software apropiado, siendo esta por tanto la variable más relevante a tener en cuenta en futuros trabajos. Las variables relacionadas con el conocimiento previo de la tecnología y del uso de distintos software y sistemas operativos no se correlacionaron significativamente con la opinión global del curso.

5. Conclusiones generales y Trabajo Futuro

A la vista de lo antes descrito queda claro que el ML y la RA son tecnologías TIC perfectamente utilizables en la docencia de Arquitectura e Ingeniería de la Edificación, siendo fáciles de usar y con grandes posibilidades de implementación, ya sea en temas patrimoniales como de mantenimiento de instalaciones. Probablemente el mayor problema estriba en la falta de desarrollo de las aplicaciones con registro por imágenes sobre teléfonos móviles 3G o *tablets*, ya sean *Android* o *Iphone*, no obstante estamos trabajando en esta línea y por el momento ya hemos conseguido crear aplicaciones experimentales para empezar a trabajar. (ver Figura 19) .Como trabajo futuro inmediato, se tratará de concluir la evaluación de los resultados del experimento con los grupos experimentales y de control de las asignaturas implicando también estas nuevas opciones junto con el uso de ficheros en formato *PDF3D*.

Figura 19. Ensayos de visualización de un modelo en teléfonos móviles *Iphone* (arriba) y *Android* (abajo)

Fuente: Tetravol, H. Zapata, A. Sánchez y E. Redondo.

Agradecimientos

Al Instituto de Recerca Històrica de la Universitat de Girona. Al Vicerectorado de Patrimonio e Infraestructuras de la UPC por la documentación del proyecto de nuevo edificio en el BKC.

Bibliografía

BENKO et al. *Collaborative Mixed Reality Visualization of an Archaeological Excavation*. En: ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, (3º, 2 al 5 de noviembre de 2004, Arlington, VA, USA). *Proceedings*. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, 2004, pp: 132-140.

BENTLEY, J. L. et al. *Optimal expected-time algorithms for closest point problems*. En: ACM Trans. Math Software, 6: 563-580, 1980.

BILÉN, S. et al. *Tablet PC use and impact on learning in technology and engineering classrooms: A preliminary study. The impact of tablet pcs and pen-based technology on education*. West Lafayette, Indiana, Ed. Robert, H. Purdue University Press, 2008, pp: 11-19.

BOLLEN, L. et al. *The Use of Mobile Computing to Support Sms Dialogues*. En: IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (4º, 30 de agosto al 1 de septiembre de 2004, Joensuu, Finlandia). *Proceedings*. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA., 2004, pp: 550-554.

CANAL, J. et al. *Del Fòrum a la Plaça de la Catedral*. En: Canal, J. et al. *Evolució urbanística del sector nord de la ciutat de Girona* (Col. Història urbana de Girona, vol 8) Girona, Ed. Ajuntament Girona y Universitat de Girona, 2007. 277 p.

FERNÁNDEZ, C. y MORILLO, A. *Fortificaciones urbanas de época bajoimperial en Hispania. Una aproximación crítica* (1ª parte). En: CuPAUAM, 18: 227-259, 1991.

FONSECA D. et al. *User Experiences and Differences in Viewing Architectural Images with Various Interfaces*. En: *International Journal of Creative Interfaces and Computer Graphics*, 2 (2): 1-22, 2011.

FRIEDMAN, J. H. et al. *An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time*. En: ACM Transactions on Mathematical Software, 3 (3): 209-226, 1977.

GALLEGO, D.J. et al. *La pizarra digital como recurso docente*. En: Revista Electrónica Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información, 10 (2): 127-145, 2009.

GEBERT, W. *Untersuchungen zur Erklärung des Vortes und seiner Anwendung*. En: Bonner Jahrbücher, 119 (2): 158-205, 1910.

GOMEZ, L. y QUIROSA, V. *Il modello infografico scientifico per la conoscenza del patrimonio culturale: metodologia e applicazione*. En: I Beni Culturali. Tutela, valorizzazione, attività culturali, architettura contemporanea e bioarchitettura, 6: 1-22, 2008.

GRAF, D. *The Via Militaris and the Limes Arabicus* in "Roman Frontier Studies 1995": Proceedings of the XVIth International Congress of Roman Frontier Studies, ed. W. Groenman-van Waateringe, B. L. van Beek, W. J. H. Willems, and S. L. Wynia. Oxbow Monograph 91. Oxford: Oxbow Books, 122-133, 1995.

GREGORY, S. *Was There an Eastern Origin for the Design of Late Roman Fortifications?: Some Problems for Research on Forts of Rome's Eastern Frontier*. En: Kennedy, D. L. (Ed.) The Roman Army in the East. En: Journal of Roman Archaeology Supplementary Series, 18: 169-197, 1990.

HENDERSON, S. y FEINER, S. *Augmented Reality for Maintenance and Repair (ARMAR)* [en línea] Fecha de consulta: 28 de noviembre de 2011. Disponible en: <<http://handle.dtic.mil/100.2/ADA475548>>.

HOPPE, T. et al. *Surface Reconstruction from Unorganized Points*. En: Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques ACM (19, 27 al 31 de julio de 1992, 1992). Proceedings. New York, 1992, pp: 125-133.

ISAAC, B. *The Meaning of "Limes" and "Limitanei" in Ancient Sources*. En: Journal of Roman Studies, 78: 125-147, 1988.

ISAAC, B. *The Limits of Empire: the Roman Army in the East*. Oxford, Oxford University Press, 1992. 510 p.

KATO, H. et al. *A City-Planning system based on Augmented Reality with a Tangible Interface*. En: IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (2º, 8 al 10 de octubre de 2003, Tokio, Japón). Proceedings. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, 2003, pp: 340-341.

Kaufmann, H., & Schmalstieg, D. *Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality*. En: International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2002). Proceedings. San Antonio, Texas, 2002, pp: 37-41.

KRISTOFFERSEN, S. y LJUNGBERG, F. *Mobile Informatics*. En: BRAA, K. et al. Planet Internet. Lund, Studentlitteratur, 2000, pp: 137-157.

LEHNER, F. y NÖSEKABEL, H. *The Role of Mobile Devices In E-Learning - First Experiences With A Wireless E-Learning Environment*. IEEE International Workshop on Wireless and Mobile Technologies in Education (1º, 29 y 30 de agosto de 2002, Växjö, Suecia). Proceedings. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, 2002, pp: 103-106.

LYYTINEN, K. y YOO, Y. *Issues and Challenges in Ubiquitous Computing*. En: Communications of the ACM, 45 (12): 63-65, 2002.

MARAMBIO, A. et al. *Urban point cloud models: 3D laser scanning of the historical centre. Tossa del mar, Catalonia*. En: Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual (IV, octubre de 2007, Guadalajara, México). Proceedings. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal., 2007.

NEUMANN, U. y CHO, Y. *A self-tracking augmented reality system*. Proceedings of ACM Virtual Software and Technology, ACM Press, New York, 1996, pp: 109-115.

NOLLA, J. M. *Excavacions arqueològiques a Girona: sondatges i troballes a la Plaça de Sant Domenec*. En: Rev. Girona, 85: 367-373, 1977.

OGATA, H. et al. *Supporting Awareness in a CSCL Environment*. En: International Journal of Cognitive Processing, 2-3: 1-15, 2003.

PALAHÍ, LL. y NOLLA, J.M. *De Kerunta a Gerunda. Els orígens de la ciutat*. Girona, Ayuntamiento de Girona, 2007. 254 p.

PEULA, J. et al. *Aplicación de realidad aumentada para la educación y difusión del patrimonio*. En: Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (XXIII, 2008, Madrid). [en línea]. Fecha de consulta: 20 de diciembre de 2011. Disponible en: <http://www.siam.uma.es/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=41&Itemid=40>.

PRAHALAD, C.K. y HAMEL, G. *The core competence of the corporation*. En: Harvard Business Review, 68 (3): 79-91, 1990.

REDONDO E. *Intervenciones virtuales en un entorno urbano. La Recuperación de la trama viaria del "call", barrio judío de Girona*. En: ACE: Architecture, City and Environment, IV (12): 77-99, 2010.

RIVEST, R. L. *On the Optimality of Elia's Algorithm for Performing Best-Match Searches*. En: IFIP Congress (5 al 10 de agosto de 1974, Estocolmo, Suecia) Proceedings. Stockholm, Sweden, 1974, pp: 678-681. ISBN 0-7204-2803-3.

SÁNCHEZ, J. y BORRO, D. *Automatic Augmented Video Creation for Markerless Environments*. En: International Conference on Computer Vision Theory and Application (2º, 8 de marzo de 2007, Barcelona, España). Proceedings. Barcelona, Ed VISAPP 2007, pp: 519-522.

SAORIN, J.L. et al. *Design and Validation of an Augmented Book for Spatial Abilities Development in Engineering Students*. En: Computer & Graphics, 34 (1): 7-91, 2009.

SMØRDAL, O. C. y GREGORY, J. *Personal Digital Assistants in Medical Education and Practice*. En: Journal of Computer Assisted Learning, 19 (3): 320-329, 2003. ISSN 0266-4909.

VIRVOU, M. y ALEPIS, E. *Mobile educational features in authoring tools for personalised tutoring*. En: Computers & Education, 44 (1): 53-68, 2005.

WAGNER, D. *Handheld Augmented Reality*. (Tesis Doctoral). Doc Program: Smart Systems for a Mobile Society: Smart Systems & Microelectronics, Telecommunications and Mobile/Pervasive Computing. Graz University of Technology. Graz, Austria. 216 p.

ZWICKER, M. et al. *Pointshop 3d: An interactive system for point-based surface editing*. En: of ACM SIGGRAPH (20 al 27 de Julio de 2002, San Antonio, TX, USA) Proceedings. ACM Press, New York, 2002, pp: 322-329.