

# Qué hacer con un modelo arqueológico virtual. Aplicaciones de la inteligencia artificial en visualización científica.

Juan A. Barceló y Oriol Vicente

Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona. España.

## Resumen.

*Durante años, los artistas han colaborado con los arqueólogos para “reconstruir” todos esos elementos antiguos que no se han preservado en el registro arqueológico, y han proporcionado a la arqueología ilustraciones artísticas del pasado. Lamentablemente, las modernas “visualizaciones infográficas” no han modificado esta actitud. Hay cientos de miles reconstrucciones infográficas de antiguos edificios y objetos prehistóricos, pero la mayoría de ellas resultan inútiles. Alternativamente, proponemos un enfoque distinto en donde la visualización por ordenador se define como la deducción lógica automatizada de de propiedades visuales de los objetos tridimensionales captadas instrumentalmente. Proponemos una estructura general basada en investigaciones recientes en Inteligencia Artificial.*

**Palabras clave:** ARQUEOLOGÍA, VISUALIZACIÓN, INTELIGENCIA ARTIFICIAL, SIMULACIÓN.

## Abstract.

*For years, artists have collaborated with archaeologists in order to “reconstruct” all those ancient things not preserved in the archaeological record, and they have provided archaeologists with artistic depictions of the past. Regrettably, modern “computer visualizations” do not modify this attitude. There are thousands of “computer reconstructions” of ancient monuments and prehistoric objects available today, but most of them are absolutely useless. Alternatively, we propose a different approach where computer visualization is defined as the automatic logical deduction of visual properties of three-dimensional objects instrumentally acquired. A general framework inspired in modern artificial intelligence is here proposed.*

**Key words:** ARCHAEOLOGY, VISUALIZATION, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, SIMULATION

## Introducción

Puede resultar paradójico, pero el actual éxito mediático de las reconstrucciones arqueológicas por medios infográficos revela un profundo vacío teórico en nuestra disciplina. Aquella manera tradicional de expresar los resultados de la investigación arqueológica bajo la forma de exposiciones de artefactos y/o de monografías más o menos ricas en material gráfico, se han sustituido por “imágenes imaginadas”, secuencias animadas imposibles de cosas antiguas sublimadas por el mero hecho de aparecer dentro de un ordenador. Si antaño la palabra impresa otorgaba el marchamo de autenticidad a lo que se podía llegar a decir, ahora, la “informaticidad” de una imagen le otorga peso específico y garantía de autenticidad. “Lo ha hecho el ordenador”, por lo tanto debe ser “científico”, dicen los medios de comunicación.

Reunidos en Londres el 5 de marzo de 2006, muchos expertos en este tema pretendieron discutir el “valor” de una reconstrucción virtual. Claro que entre esos “expertos” una mayoría estaba constituida, precisamente, por los infógrafos que nos han metido de cabeza en la confusión. La Carta de Londres para la visualización computarizada del patrimonio cultural (<http://www.londoncharter.org/>) pretende elaborar un conjunto de principios que aseguren que la visualización del patrimonio cultural se lleva a cabo como un trabajo intelectual y

técnicamente riguroso así como metodológicamente mucho más sólido. Parte de una afirmación fundamental, pocas veces tenida en cuenta: “No debe asumirse que el método de visualización computarizada sea siempre el método más apropiado para afrontar los objetivos de investigación y divulgación del patrimonio cultural”. Insiste en que debiera resultar evidente para los usuarios qué es lo que cada visualización computarizada trata de representar. Sin embargo, confunde objetivo (lo que se pretende) con objetividad (lo que se ha obtenido como resultado). No es tanto una cuestión de delimitar las informaciones de partida y el grado de incertidumbre de la representación final, como plantearse qué estamos representando. El conflicto nace de no reconocer expresamente que la imagen o modelo reconstruido no constituye la respuesta a ningún problema concreto.

Los consejos que emanan de la carta de Londres resultan, por un lado, obvios, y por otro, claramente insuficientes. Por descontado que todos esos expertos reunidos para sentar las bases de la “calidad” de los modelos infográficos no pretendían enseñar a todo el mundo cómo hacer su trabajo. El problema nace de la propia arqueología, de los mismos especialistas que dicen estudiar el patrimonio cultural, pero lo único que hacen es imaginarlo, creyendo que el objeto –sea real o virtual– constituye una explicación de sí mismo.

Si Indiana Jones buscaba tesoros para enviarlos a los museos, los ciber-arqueólogos del presente buscan basura visual

(arqueológicamente obtenida) para convertirla en atractivas imágenes. Explicar el pasado pareciera reducirse a la reconstrucción de aquello que está roto, a convertir la evidencia arqueológica en el presente en una imagen más o menos fiel de cómo fue en el pasado. Pero ¿cree alguien que eso significa explicar *qué* hicieron en el pasado, *cómo* lo hicieron, *por qué* lo hicieron?

Creemos que la Carta de Londres tiene su utilidad, pero pasa sólo por encima del auténtico problema. No se trata de encontrar formas de “validar la reconstrucción”, sino de definir realmente para qué sirve la visualización.

Obviamente no creemos que el “método” sea el culpable. No son los ordenadores ni los programas de modelado de sólidos, de animación de secuencias, de renderizado de texturas los responsables de que no sepamos para qué sirven realmente todas esas bonitas imágenes que parecen más reales que la realidad misma. Tenemos un importante conflicto con la noción misma de “visualización” que la carta de Londres no resuelve. Por muchos consejos que demos acerca de cómo visualizar la “incertidumbre”, seguimos sin sentar las bases de para qué sirve esa visualización de lo que no se puede ver en el presente, pero que creemos existió en el pasado.

La respuesta pasa por una reflexión acerca de las diferencias entre explicación y divulgación, cosa que no hace la declaración de Londres. Ya que la arqueología moderna confunde objeto con explicación, la ciber-arqueología hace lo mismo con la imagen del objeto. Nos olvidamos que en ámbitos más formalizados que el nuestro, como la medicina o la física, la visión por computador ha sido definida como la deducción lógica automática de estructuras y propiedades de los objetos tridimensionales, captadas a través de una o varias imágenes y el reconocimiento de los objetos a través de estas propiedades. Por consiguiente el uso específico de la visión computerizada en la investigación del patrimonio cultural no debería ser la reproducción de la realidad tal y como parece ser a nuestra vista, sino una forma de traducir la datos percibidos sensorialmente en un modelo explicativo de los mismos. No deberíamos crear bonitas e imaginativas ilustraciones del pasado, sino que debiera ser posible usar la geometría para explicar algunas de las propiedades de los datos: las propiedades relativas a su tamaño, forma, textura, tiempo y localización. Por lo tanto, el objetivo de un modelo arqueológico virtual debiera consistir en proveer de un vehículo para la *experimentación* con datos arqueológicos y la *predicción* de fenómenos históricos.

La declaración de Londres es muy incompleta en ese aspecto. ¿De qué manera podemos completarla?

## Visualizar el razonamiento

“El razonamiento seguido a la hora de elegir un determinado método de visualización computerizada y no otro, debe quedar perfectamente documentado y ser divulgado con objeto de facilitar la evaluación de las actividades metodológicas y para facilitar el seguimiento de posteriores actividades” (Carta de Londres, 4.7). El problema es ¿cómo “documentar” ese razonamiento?

Tradicionalmente el razonamiento suele expresarse en largas y retóricas expresiones verbales, que narran ciertas cosas que el autor quiere comunicar. Sin embargo, las palabras no son causas, ni las frases expresan mecanismos. Todo “razonamiento”

implica una mecánica concreta de producción de conocimiento, y las narraciones verbales se quedan muy lejos a la hora de caracterizar esa mecánica.

¿Podemos “visualizar” la manera de producir el conocimiento? Creemos que esta es la cuestión clave a la hora de definir una ciber-arqueología. Las tecnologías de la información no deben ser meras herramientas de comunicación, sino útiles de producción del conocimiento. Muchos de los objetivos implícitos en la declaración de Londres pueden realizarse si partimos del supuesto que el objetivo propio de la tecnología aplicada al estudio del patrimonio cultural es su explicación (automatizada). Sólo una vez que esa explicación se ha producido, podremos visualizarla para poder expresarla. La imagen virtual no es la explicación, sino que, como las palabras de un texto, *expresa* la explicación. La explicación es un constructor lógico, dinámico, y como tal debiera poder ser “visualizada”.

La arqueología debe resolver la cuestión del porqué el registro arqueológico observable es como es en términos de cómo los humanos lo produjeron. Y las tecnologías de la información debieran ayudarnos, ya sea por medio de imágenes o sin ellas. La Ciber-arqueología consiste por tanto de una cadena compleja de visualizaciones: modelos geométricos de la realidad captados por sensores automáticos que deben ser procesados por mecanismos lógicos que nos permitan inferir los procesos causales responsables de esa peculiar geometría, esto es, cómo las acciones de los hombres y mujeres del pasado convirtieron ciertas materias naturales en evidencias materiales con determinadas propiedades visuales de tamaño, forma, textura, composición y localización.

Una vía para resolver el problema consistiría en “visualizar” el modo de producir “mecánicamente” explicaciones funcionales y/o productivas, antes que “visualizar” objetos. El objetivo no sería pues la reconstrucción, ni tan sólo el proceso físico de la reconstrucción, sino el problema inverso que va del objeto original al proceso de trabajo que en el pasado produjo/utilizó ese objeto y que explica por qué tiene la apariencia que tiene. Si se ha documentado arqueológicamente como una serie de fragmentos, ¿por qué se rompió? Si no ha aparecido fragmentado, ¿por qué tiene la forma que tiene? ¿qué acto de trabajo, qué intención productiva o de uso fue responsable de que una materia prima haya adoptado esta forma final? En otras palabras, antes que el objeto debemos visualizar las acciones que pudieron haber sido realizadas sobre él, dada su estructura física y la estructura física del agente que interactuó con él. La estructura física del objeto y la acción del agente establecen conjuntamente las causas inmediatas de las características percibidas.

Así, por ejemplo, para visualizar el “conocimiento” arqueológico y la producción de conocimiento acerca del uso de un vaso prehistórico, tendremos que representar por medio de secuencias animadas de cambio y modificación las distintas fuerzas que hayan actuado sobre el elemento en el pasado, por ejemplo, ponerlo de pie, levantarlo, etc. En el caso de un recipiente o contenedor cerámico:

- (1) ENTRADAS: por ejemplo, ponerlo de pie, asirlo, etc
- (2) SALIDAS: por ejemplo, el transporte de líquidos
- (3) ESTADOS: características físicas del vaso, por ejemplo, su forma
- (4) PRIMERA RELACIÓN CAUSAL: por ejemplo, el levantamiento (entrada) actúa en su forma

(estado) → transmitiendo el líquido (salida)  
 (5) SEGUNDA RELACIÓN CAUSAL:  
 por ejemplo, el levantamiento (entrada) actúa en su forma  
 (estado) → pero la forma no cambia (dinámica: el próximo estado).

## Inteligencia Artificial y razonamiento inverso

Nos encontramos con la aparente paradoja de que para resolver la mayor parte de problemas –arqueológicos o no-, deberíamos visualizar (conocer) la solución de antemano, de manera que la mecánica de explicar se reduzca a la selección objetiva de la mejor solución de entre un conjunto de soluciones posibles. La única manera de conocer la causa dada información visual sobre los efectos consiste en elegir cual de entre una serie finita de causas conocidas produjo los efectos observados con mayor probabilidad que las demás.

El lector quizás se sorprenda por esta caracterización, típica de la Inteligencia Artificial y de la robótica. Los problemas arqueológicos son definidos comúnmente como “el efecto material de la acción social ocurrida en el pasado que queremos explicar pero no sabemos cómo”. Ahora parece ser que el pasado es conocible si y sólo si ya lo conocemos.

En realidad no hay nada extraño en ésta aproximación. Haciendo uso del conocimiento previo, podemos diseñar un sistema computerizado capaz de inferir, desde datos sensoriales, qué es lo que da sentido a esos datos. La explicación ocurre cuando un *input* perceptual coincide con una definición contenida en la memoria perceptual de cada uno de los eventos causales que el sistema espera *reconocer* o *identificar*. Esta visión es también coherente con una concepción de las teorías científicas como una estructura que sirve para elegir un modelo específico de un conjunto de modelos posibles. Los resultados preliminares de un reconocimiento o identificación preliminar deberían combinarse para obtener pautas globales que actúen como entrada de nuevos patrones de inferencias más complejas. De esta forma un posible arqueólogo autómatas resolvería los problemas a partir del reconocimiento de la materialidad, y con la ayuda de este resultado podría llegar a producir la explicación consiguiente.

Reconocer el pasado en el presente es pues una tarea gradual que procede de lo general a lo específico y que solapa, guía y limita la obtención de una explicación causal de los *inputs* adquiridos en el yacimiento o en el laboratorio. El proceso general explicativo trata pues de desglosar y extraer un número de diferentes propiedades físicas observables (bajo nivel de análisis), seguido de una decisión definitiva sobre la base de estas propiedades (análisis de alto nivel). Los procesos de bajo nivel generalmente se basan en la extracción de las características relevantes (tamaño y frecuencia, forma y composición) que caracterizan a la individualidad de cada caso arqueológico (Gibson 1979).

En consecuencia, la comprensión automática puede ser entendida como el generador de una serie de descriptores del mundo físico actual que pueden ser suficientes (quizás conjuntamente con otra información contextualizada) para identificar momentos de la acción social ocurrida en el pasado, de acuerdo con lo que el robot conoce de ellas a través de los experimentos del laboratorio, de las simulaciones computerizadas y de las analogías etnoarqueológicas.

La Inteligencia Artificial nos ofrece tecnologías capaces de “virtualizar” no sólo la manera de resolver el problema arqueológico, sino la definición misma del problema. Las redes neuronales y la nueva generación de sistemas expertos ejemplifican este enfoque (Barceló 2008, Dawson 2004, Jones 2007, Munakata 2008). Un Sistema Experto es un programa informático escrito como una serie organizada de reglas que pueden ser cambiadas, y que de hecho, están siempre cambiando en una relación reflexiva permitiendo a los expertos dar cabida a una nueva información. A partir de unos datos empíricos sobre una observación particular y algún conocimiento asociativo (*Si...Entonces*), el problema científico puede ser explicado en términos de los conocimientos almacenados en las bases de reglas. Las redes Neuronales siguen el mismo enfoque, aunque en este caso, el conocimiento asociativo no está expresado de una forma declarativa-proposicional, si no usando transformaciones vectoriales. El *input* de entrada activa una primera transformación –del *input* sensorial a la representación vectorial del mismo- y esta activación se propaga a través del sistema por vía de transformaciones sucesivas hacia conceptos cada vez más generales y de mayor nivel de complejidad lógica. En una red neuronal casi todo el conocimiento está *implícito* en la estructura del dispositivo que lleva a cabo la tarea, más que *explícito* en los estados de las unidades por ellas mismas. El conocimiento no es directamente accesible a la interpretación, sino que se construye en el propio procesador. Éste determina directamente el proceso. Éste se adquiere a través del ajuste de las conexiones mientras se van utilizando en el proceso, en lugar de hechos explicativos ya formulados y almacenados. El ordenador integra la información de un gran número de fuentes de entrada, produciendo un valor numérico real continuo que representa algo así como la fuerza relativa de éstos *inputs* (en comparación con otros *inputs* que podría haber recibido). El modelo computerizado entonces comunica otra señal clasificada (su tasa de activación) a la representación vectorial de otras explicaciones en función de la fuerza relativa de este valor. Estas señales clasificadas pueden transmitir algo así como la probabilidad de la causa en algunas específicas circunstancias limitadas (Bicici y St.Amand 2003).

La aplicación mas obvia de los Sistemas Expertos y las redes Neuronales en arqueología y en la gestión del Patrimonio Cultural, está en resolver problemas de diagnóstico. Los ejemplos son varios, desde el estudio de la forma y función de útiles de sílex del Paleolítico hasta la cerámica prehistórica. Los edificios antiguos también pueden ser explicados a través de sus características visuales arquitectónicas, y las características visuales de los huesos humanos y animales pueden ser usadas como categorías explicativas bien definidas. También es posible mecanizar el proceso de clasificación de muestras de madera antigua para su determinación taxonómica. Los sistemas de Inteligencia Artificial también pueden ayudar a la investigación a descodificar los patrones decorativos de la cerámica o del arte parietal. En otras aplicaciones arqueológicas se han explorado las posibilidades de identificar un artefacto entero a partir de sus fragmentos; el análisis y la interpretación histórica a partir de los análisis arqueométricos en el ámbito de los estudios de procedencia, la interpretación de fotografías aéreas y el análisis de imágenes de teledetección para detectar características relevantes en el paisaje (Barceló 2008).

Estas técnicas de Inteligencia Artificial pueden vincularse a la representación de los datos arqueológicos mediante modelos geométricos realistas (visualización científica), de manera que es el *input* sensorial mismo el que es explicado directamente, sin pasar por su tradicional descripción en términos lingüísticos. No

es la palabra “yacimiento arqueológico” la que debemos explicar, sino la información sensorial (datos visuales) captada instrumentalmente. También la respuesta del sistema puede aparecer expresada visualmente (modelo geométrico), pero en cualquier caso, lo importante no es la imagen resultante, sino la conexión necesaria entre input (visual) y output (explicación) (Chaigneau et al. 2004).

Sistemas expertos y las redes neuronales son metodologías “tradicionales” de Inteligencia Artificial que han sido criticadas, fundamentalmente en base a su “asociacionismo” latente, lo que implica el renacimiento del enfoque empiricista radical que dominó “la edad oscura” de las ciencias sociales. En esa época la explicación se basaba en interpretaciones medioambientales y en los comportamientos ambientales que producía. En muchos aspectos, los sistemas expertos y las redes neuronales hicieron eco de ésta tendencia. Fundamentalmente los sistemas computerizados que hemos analizado dan sentido a los estados del sistema sobre la base de lo que se correlaciona con, y hay graves problemas filosóficos, no sólo en relación con la semántica de un cálculo basado en la correlación de causalidad, sino también, en general, la adecuación de correlación semántica como base de cualquier teoría del significado.

## Conclusiones

La implementación de las potencialidades explicativas en una máquina es lo que comúnmente se denomina “simulación computerizada”. La simulación no es exactamente “virtual” o imaginaria ya que cualquier forma de simular lo que ocurrió en el pasado requiere la implementación de un mecanismo, que, habida cuenta de las propiedades de los elementos constitutivos y del entorno, dé lugar a los fenómenos de interés.

Por descontado, no podemos saber qué es lo que realmente ocurrió, pero podemos llegar a saber lo que “probablemente” tuvo lugar. Virtualmente podemos imitar la historia humana en el ordenador, explorando (al alterar las variables) toda la gama de posibles resultados para diferentes comportamientos. Podemos comparar que hubiera pasado con los parámetros introducidos en otro ordenador y conocer la sociedad pasada mejor que nunca. Cuando este tipo de simulación funciona, el sistema funciona de una forma determinada y muestra ciertas conductas. La simulación puede proporcionar una prueba de los modelos y de las teorías implícitas o simplemente permitir al observador experimentar y registrar el comportamiento del sistema. Mientras el énfasis cambia al describir el comportamiento de un sistema objetivo con el fin de comprender los sistemas sociales naturales, así también lo hace el objetivo de la investigación durante la observación y la experimentación con posibles mundos sociales.

Al simular la estructura física y la acción del agente para las diferentes categorías de evidencia arqueológica, seremos capaces de predecir el comportamiento pasado. Si las descripciones físicas del objeto son un tanto vagas, entonces el conocimiento sobre la historia del objeto puede influir en las predicciones de cómo conceptualizar su estructura física, que a su vez puede influenciar sobre la explicación arqueológica. Si la historia del objeto no es del todo completa, la máquina puede inferir que la

estructura física del objeto puede ser defectuosa. Este enfoque asume que una serie de estados causales vinculados – un modelo

causal – soporta inferencias sobre la acción actual y la imaginada. El modelo capta la estructura causal básica a través del examen de la estructura física del objeto y de las capacidades del agente para actuar con el objeto dando un resultado funcional. Como la estructura física de un hacha y la acción de la persona causa el resultado de cortar madera. Evidentemente, no todos los elementos causales deben ser incluidos en este modelo causal. Debemos asumir que cuando definimos los modelos causales de la función de un objeto, estos no incluyen todos los componentes físicos necesarios. Sin embargo, podemos captar la estructura causal central a través de teorías intencionales; es decir, el papel funcional imaginado para un objeto, que se le adscribió a través de su estructura física. Desde esta posición de la función, la estructura física es un efecto del proceso histórico, no una causa de la función.

Algunas de estas tecnologías pueden ser difíciles de aplicar en la arqueología. Especialmente, en el enfoque interactivo, los arqueólogos deben darse cuenta de que el único enfoque posible de la explicación funcional es la experimentación y el la cuidada réplica de las antiguas técnicas y comportamientos. De esta manera, un razonamiento a partir de la función puede ser visto como una forma limitada de satisfacer el problema, ya que las descripciones funcionales limitan la estructura o la estructura limita las posibles funcionalidades. Las asignaciones disponibles entre forma y función son muchas actualmente y cada vez hay más que para recuperar un objeto usan la experiencia combinada de la funcionalidad ya reconocida de los objetos. El reconocimiento a través de un modelo es aceptado como una solución. Otro punto de vista es aquel que considera el razonamiento sobre la funcionalidad como un modulo de planificación que está compuesto por procedimientos de ayuda. En este punto de vista, la descripción funcional se lleva a cabo a un alto nivel, descartando la representación completa. Una representación completa del mundo físico debería intentar representar las fuerzas que gobiernan el universo y que van desde las fuerzas gravitacionales entre los planetas a las fuerzas entre los componentes químicos y sus átomos.

¿Qué tiene que ver nuestra perspectiva con la Carta de Londres? Muy sencillo, que esa declaración resulta ambigua al dejar a juicio de los usuarios la utilidad del modelo. Como consecuencia, pareciera que el objetivo de todo el esfuerzo es la producción del modelo por el modelo, como si lo único importante fuese pintar con colores virtualmente atractivos una realidad polvorienta y fragmentada. Por el contrario, las tecnologías de la información nos permiten pensar de otro modo, nos permiten visualizar la manera misma de pensar.

En lugar de insistir tanto en la “certidumbre” del modelo visual, debiéramos insistir más en la “formalización” del pensamiento, en la necesidad de crear algoritmos de pensamiento e interpretación. Ciber-arqueología no es pues un conjunto de sueños virtuales, hipótesis libres que flotan a disposición de distintos usuarios con distintas necesidades. Significa utilizar la potencia de la algorítmica para objetivar e instrumentalizar la manera que tenemos de explicar por qué las evidencias que del pasado se han conservado en el presente son como son y no de otra manera.

**Bibliografía**

- BARCELÓ, J.A., 2008, *Computational Intelligence in Archaeology*. Information Science Reference, The IGI Group, Henshey (VA).
- BICICI, E. ST. AMANT, R. 2003, *Reasoning about the Functionality of Tools and Physical Artifacts*. Technical Report TR-2003-22, Department of Computer Science, North Carolina State University.
- DAWSON, M.R.W., 2004, *Minds and Machines. Connectionism and Psychological Modeling*. Blackwell Pub. London.
- CHAIGNEAU, S.E., BARSALOU, L.W. SLOMAN, A. 2004, "Assessing the Causal Structure of Function" *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, (4), pp. 601–625.
- GIBSON, J.J., 1979, *The Ecological Approach to Visual Perception*. Mifflin, Boston.
- JONES, T., 2007, *Artificial Intelligence: A Systems Approach*. Infinity Science Press, Hingham (MA).
- MUNAKATA, T., 2008, *Fundamentals of the New Artificial Intelligence*. Springer, Berlin.