

Dispersiones humanas y culturales durante la Transición Neolítica: Sistemas Complejos y Prehistoria

JOAN BERNABEU AUBÁN

RESUMEN

En este texto se explora la complementariedad y la utilidad de la Teoría Evolutiva y de los Sistemas Complejos Adaptativos en su aplicación a la Arqueología. Si bien la primera de las aproximaciones goza de una más extensa tradición en nuestra disciplina, la aplicación de los conceptos y métodos basados en la(s) Teoría(s) de la Complejidad son mucho más recientes. En este contexto el desarrollo del modelado computacional, generalmente, aunque no sólo, de modelos de agentes, constituye una herramienta eficaz para evaluar hipótesis sobre cambios a largo plazo que afectan a las sociedades humanas. A partir de dos ejemplos relacionados con el Neolítico, se exploran las características de estos nuevos conceptos y métodos incidiendo de forma especial en la problemática que para su correcta utilización entraña la comprensión de qué es y cómo se forma el registro arqueológico.

PALABRAS CLAVE: Neolítico, Sistemas Complejos Adaptativos, Teoría Evolutiva, Modelado Computacional.

ABSTRACT

Human and cultural dispersions during the Neolithic Transition: Complex Systems and Prehistory. This text explores how the complementarity and usefulness of Evolutionary Theory and Complex Adaptive Systems in its application to the archeology. While the first of these approaches has a longer tradition in our discipline, the application of the concepts and methods based on (s) Theory (s) of complexity are much more recent. In this context the development of computational modeling, generally, but not exclusively, Agent Based Models, is an effective way to test hypotheses about long-term changes affecting human societies tool. From two examples related to the Neolithic, the characteristics of these new concepts and methods are explored, focusing specially on the problem that for its use entails understanding what is and how the archaeological record is formed.

KEYWORDS: Neolithic, Complex Adaptive Systems, Evolutionary Theory, Computational Modeling.

Corría el año 1976. Me encontraba a mitad de mis estudios de licenciatura, con intención de profundizar en algún campo relacionado con la Arqueología, pero aún no tenía claramente decidido hacia donde dirigiría mis pasos, más allá de una vaga preferencia por el mundo antiguo. Al final la decisión no fue sólo mía. Vino de la mano de mi participación, por vez primera, en una excavación arqueológica. A través de mis compañeros, acudí a Bernat Martí, que por aquel entonces había retomado las excavaciones en la Cova de l'Or, para preguntar por la posibilidad de asistir a la campaña de excavación de ese verano. La experiencia que a la postre resultó de su respuesta afirmativa, terminó por transformar mis inquietudes.

Mi interés por la Prehistoria Reciente y, más en concreto por el Neolítico, es claramente deudora de aquellas ya lejanas experiencias. Por eso, cuando desde el Museo de Prehistoria de Valencia me propusieron participar en un volumen de homenaje a Bernat Martí, con ocasión de su jubilación, no lo dudé un sólo instante. La decisión sobre el tema a tratar fue algo más costosa.

Me parecía claro que este debería versar sobre el Neolítico; lo que no resultaba tan evidente era sobre qué aspectos del Neolítico debería centrar mi atención.

Vistas en perspectiva, las casi cuatro décadas transcurridas desde que de la mano de Bernat Martí entré en contacto con la arqueología del Neolítico, han supuesto gran cantidad de cambios tanto empíricos como teóricos. No es mi intención relatar ahora, siquiera sea brevemente, la historia de tales cambios. Creo más interesante centrar esta aportación en algunos aspectos recientes que, al menos desde mi punto de vista, implican una mayor capacidad de entender la forma en cómo podemos analizar y comprender mejor el registro arqueológico. Para ello utilizaré algunos de los viejos problemas y, otros nuevos, referidos al Neolítico.

Generalmente se admite que los datos arqueológicos sugieren dos vías geográficas primarias utilizadas para la expansión de la agricultura en Europa: a través del corredor del río Danubio y alrededor del litoral mediterráneo. Aunque hasta la fecha

la mayoría de los esfuerzos en la modelización se ha centrado en el corredor danubiano, recientes avances parecen mostrar paralelismos interesantes entre ambas regiones, incluyendo:

a) Una expansión rápida pero discontinua dejando grandes áreas desocupadas por los agricultores, al menos en los momentos iniciales.

b) Una distribución posterior amplia de los complejos neolíticos –el LBK en la Europa Central y el Impreso-Cardial en el Mediterráneo– y pocas centurias después una marcada fragmentación de estos patrones culturales.

¿Pueden estos procesos aparentemente paralelos en ambas áreas relacionarse con las fluctuaciones demográficas (incluyendo migraciones), cambios climáticos globales, problemas de transmisión cultural o fragmentaciones de las redes sociales? Y lo que es más importante, ¿cómo podemos identificar de manera fiable estos fenómenos en el registro arqueológico de manera que pueda evaluarse entre modelos alternativos de dinámicas sociales relevantes?

La respuesta pasa no sólo por disponer de más información, sino también por comprender qué representa y cómo esta constituido el registro arqueológico, y, paralelamente, desarrollar otras formas de enfocar las dinámicas del cambio social. Los nuevos enfoques relacionados con los Sistemas Complejos y la teoría Evolutiva pueden, en mi opinión, ayudarnos en este propósito.

1. SISTEMAS COMPLEJOS, EVOLUCIÓN Y ARQUEOLOGIA

Antes que nada debe subrayarse que no existe equivalencia entre el concepto “sociedad compleja”, utilizado generalmente en las ciencias sociales y más específicamente en Arqueología, y el más general de “sistema complejo”; de hecho la más simple de las sociedades humanas se considera un sistema complejo.

Los Sistemas Complejos Adaptativos (CAS, de sus siglas en inglés), representan sistemas dinámicos caracterizados por la transmisión y procesamiento de información que les permite adaptarse a los cambios motivados por circunstancias externas e internas. Aunque las aproximaciones basadas en los Sistemas Complejos aún no se contemplan conjuntamente bajo un marco teórico sólido, se han identificado importantes propiedades de organización y comportamiento a través de diferentes fenómenos. Algunas de éstas son particularmente interesantes cuando se aplican a las ciencias sociales y, por tanto, también a la Arqueología.

Los CAS son sistemas abiertos. Necesitan capturar energía para mantener su estructura y orden, es decir, para reproducirse como tales. Por ejemplo, el ser humano necesita capturar energía para subsistir, y lo hace a través del agua, la comida y el aire. En la sociedad, por ejemplo, este papel puede ser interpretado por la información, la forma cómo se genera y distribuye, afectando a las formas como esta se organiza. Por esta razón el procesamiento de la información es un requisito importante para que cualquier grupo social pueda reproducirse.

Los CAS están formados por multitud de componentes (células en un organismo, neuronas en el cerebro, individuos en una sociedad) que se organizan en una jerarquía de grupos superpuestos de profundidad variable. Cuanto más complejo es un sistema, mayor cantidad de niveles organizativos superpuestos.

En términos sociales, por ejemplo, puede tratarse de familias dentro de bandas de forrajeadores, dentro de metapoblaciones regionales; o artesanos, dentro de gremios, dentro de ciudades organizadas en estados. Esta clase de organización resulta de la forma en que estos sistemas crecen: los componentes de más bajo nivel se reúnen en subgrupos y estos, a su vez, en grupos de alcance cada vez mayor. Esta característica permite explicar la trayectoria evolutiva, de lo simple a lo complejo, repetidamente observada en diversos trabajos arqueológicos (y de otras disciplinas) y que podríamos denominar como progresivismo evolutivo (p.e. Rosenwig, 2000: 4).

Una implicación de este proceso es que los subsistemas que lo componen están conectados entre sí a su mismo nivel, más que al de sus componentes. Por ejemplo, en un estado tributario forma parte de un imperio territorial, alianza que se expresa a través de la relación entre los jefes de tal estado y del imperio del que forma parte y no a través de las relaciones personales de cada miembro del estado tributario con el “emperador”. Un corolario interesante que deriva de esta característica es que los subsistemas pueden seguir desarrollando sus funciones aunque el sistema (imperio en el caso anterior) se fragmente o colapse, dando lugar a distintas entidades territoriales independientes. Por ejemplo, las córneas o los corazones humanos, pueden trasplantarse y seguir desarrollando sus funciones. Esta propiedad, denominada *Descomposición Cercana*, significa que los sistemas complejos tienden a fragmentarse en sentido inverso a como se han formado. Como sistemas complejos, podemos esperar que las sociedades humanas se comporten de modo similar.

En los CAS, las relaciones entre sus componentes son tan o más importantes que sus características de manera que podría decirse que son aquellas las que determinan el comportamiento del sistema en su conjunto. Las interacciones entre individuos y grupos en las sociedades humanas pueden representarse como redes, en las que los agentes sociales serían los nodos, y las conexiones entre nodos (aristas en la terminología propia del análisis de redes) representarían las interacciones (Wasserman y Faust, 1994). Esto permite la aplicación de un buen número de herramientas y modelos matemáticos desarrollados en este campo (Newman, 2010) para comprender la dinámica evolutiva de las redes sociales, cuyo impacto no ha pasado desapercibido en nuestra disciplina (Knaped, 2010; Mills et al., 2013; Brughmans, 2012).

Una de las características clave de los CAS es que la relación entre sus componentes es dinámica, y resulta capaz de transmitir información sobre el estado del sistema a partir de interacciones mayoritariamente locales. Suele decirse que el carácter de la relaciones entre sus componentes es tan o más importante que la naturaleza de los mismos para comprender el comportamiento general de CAS. Es decir, que las *Dinámicas* propias de estos sistemas son *no Lineales*. Como consecuencia, la dirección y la escala de los cambios del sistema no son directamente proporcionales a las propias del fenómeno (o fenómenos) que las causan. O sea, las mismas causas no provocan los mismos efectos, y su corolario: idénticos efectos pueden obedecer a causas distintas. Este aspecto es consecuencia de la conocida como “sensibilidad” a las condiciones iniciales que, desde una perspectiva de la Historia, significa reconocer la incidencia de la coyuntura histórica en la trayectoria posterior de las

sociedades humanas. En términos de CAS, pequeñas diferencias en las condiciones iniciales pueden derivar en trayectorias divergentes con el paso del tiempo.

Esta causalidad no lineal hace difícil predecir los cambios del sistema en base de las propiedades de sus componentes. Lo que nos lleva a otra de las características de estos sistemas: la *Emergencia*, esto es, la propiedad que tienen estos sistemas de exhibir comportamientos que no están contenidos en ninguna de sus partes componentes. Por ejemplo, los atascos de tráfico pueden verse como una propiedad emergente de un sistema formado por coches, conductores y vías de comunicación, así como sus interacciones.

¿Cómo pueden estos conceptos ayudarnos en la resolución de los problemas de la arqueología? La respuesta, en mi opinión, depende de si somos también capaces de comprender la naturaleza del registro arqueológico y desarrollar metodologías adecuadas para utilizarlo en la verificación de hipótesis. A pesar de su potencial como marco adecuado para la explicación de los procesos de cambio a largo plazo, como los propios de la Arqueología, la aplicación de una perspectiva CAS a la arqueología entraña ciertas dificultades y, desde luego, supone un reto evidente. Un enfoque tipo CAS supone centrar nuestra atención en dinámicas como el flujo de información, la toma de decisiones, las interacciones que se realizan a diferentes escalas organizativas, así como las dinámicas mediante las cuales los agentes interactúan entre sí dando lugar a la formación de comportamientos sistémicos emergentes, que son los que generalmente nos interesa explicar.

Sin embargo, no tenemos modo de observar estas dinámicas en el registro arqueológico. Debemos reconocer que éste, a la postre, constituye un conjunto, a veces desorganizado, de elementos materiales, estático, fragmentario y acumulativo (p.e., consecuencia de la acción continuada de diversos agentes durante períodos más o menos largos de tiempo). Los patrones significativos que podemos observar en él constituyen las consecuencias materiales indirectas de tales dinámicas, pero no las dinámicas (agencia, emergencia) en sí mismas (Barton, 2012).

La pregunta entonces es: ¿cómo podemos reconocer y explicar cadenas causales no-lineales que derivan de la actuación de individuos y los grupos entre sí y con el medio biofísico? Necesitamos algún modo de hacer operativos los conceptos CAS en su aplicación a la Arqueología, de manera que podamos reconocer sus efectos en el registro aunque no podamos observarlos directamente, esto es, ¿qué elementos del registro arqueológico constituyen indicadores adecuados de las dinámicas evolutivas humanas que se quieren analizar?

Aunque existen algunas propuestas preliminares y tentativas en este sentido (Bernabeu et al., 2012), debemos reconocer que todo ello requiere de una teoría robusta sobre los motores de estas dinámicas y desde luego de nuevas formas de praxis arqueológica.

Respecto a la praxis arqueológica, sería conveniente desplazar nuestro enfoque desde la reconstrucción inductiva en la que ahora nos movemos, hacia formas de evaluar sistemáticamente hipótesis. Ciertamente, no podemos realizar experimentos a la manera en que lo hacen otras disciplinas; sin embargo, el *modelado computacional* puede ofrecer una vía para representar la forma en que los CAS funcionan y se modifican (Mitchell, 2009). Básicamente se trata de desarrollar (poner a punto) “la-

boratorios virtuales” en los cuales generar resultados, a partir de hipótesis previas, que después habrán de evaluarse frente al registro arqueológico.

El modelado computacional envuelve la generación de múltiples entidades discretas (o agentes), imbuidas de un conjunto de reglas algorítmicas mediante las cuales percibe y filtra su medio, procesa la información y realiza acciones en base a tal información. Estas entidades operan e interactúan en un mundo virtual, aunque en ocasiones representa al mundo real, y pueden tomar formas diversas: las celdas de un tablero en un modelo de Automatas Celulares; nodos y aristas en una Red Dinámica o agentes en un Modelo Basado en Agentes (Gilbert y Troitzsch, 2005).

En el contexto de los sistemas complejos adaptativos la simulación computacional posibilita realizar inferencias sobre los aspectos ausentes del registro arqueológico. La Teoría de la evolución tiene un papel principal ya que permite dotar a los agentes de reglas de comportamiento generando escenarios (p.e., registros arqueológicos) alternativos (Miller y Page, 2007: 180).

Debe quedar claro que el objetivo no es reconstruir sociedades del pasado, sino más bien construir entornos virtuales en los cuales el investigador puede modificar sistemáticamente las condiciones y variables que se supone influyen en ciertas dinámicas; de este modo se genera un abanico de resultados posibles y controlados que son los que, finalmente, se compararán con el registro arqueológico.

Un par de ejemplos pueden ayudarnos a comprender cómo se desarrolla este proceso. El primero presenta el problema de los ciclos de auge y caída, de expansión y fragmentación cultural que han generado un reciente interés en la bibliografía. En el mismo me limito a presentar cómo un enfoque basado en los anteriores presupuestos se enfrenta a este problema. El segundo sí presenta un modelo, elaborado a partir de los autómatas celulares, para tratar de explicar el clásico problema de cómo se produjo la expansión del Neolítico.

2. AUJE Y CAÍDA DEL MUNDO CARDIAL

Desde que Bocquet-Appel (2002) desarrollara el concepto de Transición Demográfica Neolítica (TDN), diferentes aproximaciones han tratado de describir y explicar la dinámica evolutiva del primer Neolítico como un ciclo de auge y caída, que no es tan sólo demográfico. Diversos autores, utilizando las fechas C¹⁴ como una especie de indicador demográfico, identifican un patrón consistente en un rápido auge demográfico coincidente con la aparición del primer Neolítico, seguido, unas centurias después, por un igualmente rápido descenso en diferentes regiones europeas (Shennan et al., 2013), incluyendo la península Ibérica (Bernabeu et al., 2014; Balsera et al., 2015).

Curiosamente este fenómeno parece correlacionarse con el desarrollo inicial de entidades arqueológicas –culturas– extensas (LBK, impreso-cardial), seguido de una posterior fragmentación que coincidiría con el final del Neolítico antiguo y con el descenso demográfico antes citado. Todo ello sugiere la existencia de redes extensas de interacción dentro de las cuales la información y los objetos fluyen afectando a grandes áreas con diferentes escalas e intensidad y, coincidiendo con el declive, alguna clase de fragmentación de estas redes de interacción social, afectando al flujo de información previamente establecido.

Se han aducido tanto causas internas –un crecimiento rápido que llevó a la población cerca del umbral económicamente sostenible (Shennan et al., 2013)–, como externas –específicamente cambios climáticos globales cuyo efecto sería similar (Groneborn, 2010)– para explicar este patrón. Sin embargo, tal y como se ha señalado en otras ocasiones (Bernabeu et al., 2014), las consecuencias de estos factores para las sociedades humanas son variables local y regionalmente. Esta variación se debe, por ejemplo, a la diversa importancia de los factores bióticos y del comportamiento humano; y como ambos aspectos son históricamente contingentes, resultaría sorprendente encontrar los mismos efectos en todas partes como consecuencia de eventos climáticos globales; o el aumento de la densidad demográfica y sus efectos sobre los recursos. Asumiendo esto, parece claro que lo que necesitaríamos es no sólo un mayor y mejor registro (como es común advertir en la mayoría de los trabajos arqueológicos), sino también una forma de comprender cómo dinámicas locales distintas pueden resultar en patrones globales de cambio, justamente los que queremos explicar. Y es justamente este aspecto el que nos puede permitir profundizar en la comprensión de los fenómenos causales que se encuentran detrás de estos “ciclos”, a través de la dinámica de redes.

En dos trabajos recientes, uno de ellos aún inédito, varios autores nos preguntábamos acerca de la existencia de estos ciclos y las razones (causas) que podrían explicarlo. Tras comprobar que si bien a escala peninsular, existía cierta coincidencia entre el evento climático 7.1 ka cal BP (relacionable con el IRD 5b), y una caída en las curvas de datación radiocarbónica, enfocando este mismo aspecto región a región se evidenciaba cierta diversidad de situaciones reflejo de que, como suponíamos, las consecuencias de tal evento climático global eran regionalmente diversas.

Como alternativa, se decidió examinar los efectos de la interacción entre los sistemas agrícolas y el territorio circundante durante generaciones. Utilizando los resultados del proyecto MEDLAND (Barton et al., 2012), diseñado para reproducir estos efectos sobre simulaciones computacionales en ambientes mediterráneos. Sus resultados sugerían que cierta clase de prácticas agrícolas tuvieron un efecto expansivo sobre pequeñas comunidades, pero a medida que estas crecían traspasando ciertos límites localmente determinados, las consecuencias de estas mismas prácticas cambiaban, creando un desequilibrio que finalmente afectaba negativamente a su territorio de producción agrícola.

La pregunta es: ¿cómo pudieron estos procesos ser responsables de los cambios descritos a nivel del sistema?, y, en caso afirmativo, ¿cómo podemos evaluarlos? La respuesta a la primera cuestión descansa en las estrategias implementadas por las comunidades locales, descubiertas por el modelo: reducción del tamaño de los grupos, vía fisión y migración o, lo que no resulta tan evidente a primera vista, aumentando el área dedicada al pastoreo en relación con la agricultura. Nada impide, por otra parte, que se intentaran ambas estrategias a un tiempo. En cualquier caso, estas estrategias implicaron cambios locales que afectaron a la ubicación y/o desaparición de sitios. En términos de Redes: las respuestas implicaron la modificación/desaparición de ciertos nodos, afectando al flujo de información a través del sistema y, en consecuencia, modificando el sistema a escala global.

Para evaluar esta hipótesis se necesita actuar en un doble sentido. Primero, comprobando si existen indicadores arqueológicos que sugieran la presencia de nuevas estrategias económicas que impliquen un mayor peso de las actividades ganaderas; o la desaparición de sitios ocupados, junto a la ocupación de nuevas zonas; y, en segundo lugar, la reconstrucción de las redes de interacción social de manera que puedan generarse diversos escenarios de distribución de patrones de cultura material comparables con los observables en el registro. El primer aspecto parece que encuentra cierto soporte en el registro (Bernabeu et al., en prensa); el segundo necesita de la implementación de un modelo y la recogida de información clave (otra vez indicadores arqueológicos) sobre diversos aspectos de cultura material en los que se está trabajando en estos momentos.

3. LA EXPANSIÓN DEL NEOLÍTICO. ESPACIO, TIEMPO Y CULTURA

Probablemente, el problema de la expansión del Neolítico en Europa ha sido y es uno de los asuntos que más literatura arqueológica ha generado. En la actualidad, suele admitirse que la agricultura y la ganadería se introducen en el continente a partir del próximo oriente. Consecuentemente, su expansión implicó la distribución espacial y temporal de las nuevas especies, de nuevas tecnologías y prácticas sociales. Sin embargo, todavía existe debate en torno a los mecanismos concretos que motivaron dicho proceso. ¿Fue consecuencia de los movimientos migratorios correspondientes a los grupos de agricultores, mezclándose o no con los grupos mesolíticos allí donde existieron?, ¿o más bien fue la transmisión de la información, de los materiales y de las tecnologías apropiadas para su utilización las que se desplazaron y propiciaron la formación de las primeras culturas neolíticas? (difusión démica vs. difusión cultural).

La aproximación más conocida a este problema fue la propuesta por Ammerman y Cavalli-Sforza (1984). Esta trataba de explicar el gradiente cronológico observado en sentido SE-NW utilizando una versión de las ecuaciones de reacción-difusión propuesta originariamente por Fisher. Con posterioridad, utilizando bases de datos de radiocarbono cada vez más amplias, este gradiente ha sido comprobado en repetidas ocasiones. Sin embargo, la relación lineal entre cronología y distancia al centro originario que se encuentra detrás de este gradiente, dejaba cierta parte de la variación sin explicar, lo que sugería que el proceso de dispersión pudo ser regionalmente heterogéneo, dejando abierta la posibilidad de que el patrón global observado fuera el resultado de una expansión démica, cultural o, más probablemente, una mezcla regionalmente variable de ambas.

Paralelamente, se han propuesto diversos modelos narrativos (no formales) que tratan, justamente, de dar cuenta de la variabilidad inexplicada por el modelo de “Ola de Avance”. Estos modelos necesitaban movilizar otras variables, además del espacio y el tiempo, para poder ser evaluados. Por ejemplo:

- La interacción entre diferentes grupos (mesolíticos/neolíticos), dando lugar a hibridaciones o transferencias que se proponen en algunos modelos (Arritmico, Dual, Disponibilidad), necesita movilizar variables de cultura material para evaluar el efecto de tal interacción en los patrones de variabilidad cultural resultantes.

- Por otra parte, si, como se asume generalmente, la expansión se debió fundamentalmente a un proceso demico, deberíamos asumir que tal proceso necesariamente tuvo algún efecto en la variabilidad cultural en el espacio y en el tiempo, como resultado, por ejemplo, de la hipótesis del Autoestopista: “Demic flow raises the possibility that cultural, genetic and linguistic traits with no intrinsic advantage may ‘hitchhike’, i.e., spread with the advancing farmers” (Ackland et al., 2007: 8714). Es decir, cualquier rasgo preexistente junto con el ventajoso puede ser transportado junto con la difusión de éste con independencia de su valor intrínseco.

La hipótesis del “autoestopista” es un préstamo tomado de la genética donde se trata de explicar la difusión de un carácter neutro en una población como consecuencia de su “asociación” con otro ventajoso. En la sugerencia expresada por Ackland y colaboradores, ambos caracteres son culturales aunque de naturaleza distinta: el papel del gen ventajoso estaría representado por la agricultura y ganadería; mientras que el carácter neutro podría ser la lengua o, lo que puede ser más interesante para nosotros, el sistema decorativo de la cerámica.

Ambos procesos (autoestop cultural, interacción e hibridaciones Mesolítico-Neolítico) afectan, evidentemente, a los patrones de variabilidad espacio-temporal de los ítems culturales. Y, por tanto, necesitan movilizar variables relativas a la cultura material para ser evaluados. Desde una perspectiva evolucionista, los patrones espaciales de la “cultura” pueden explicarse como consecuencia de procesos de transmisión vertical u horizontal o, quizás, como una mezcla de ambos procesos. Esto no es sorprendente, dado que ambos procesos están influenciados por distintos factores, cada uno de los cuales puede generar resultados diferentes en el registro. Por ejemplo, la tasa de mutación o las preferencias de interacción entre individuos y grupos.

Pero además, como se ha puesto de manifiesto recientemente (p.e. Crema et al., 2014) no resulta fácil decidir, en base al análisis empírico solamente, qué factores determinaron la variabilidad real observada. Nos encontramos, por tanto, ante problemas similares: ¿de qué procesos son resultado los patrones espacio-temporales observables en el registro arqueológico del primer Neolítico? Si el simple análisis empírico no proporciona respuesta fiable, ¿cómo podemos aproximarnos a estos problemas?

En los dos ejemplos citados más arriba, ¿qué factores intervienen en la conformación del patrón espacio-temporal relativo a la aparición del Neolítico y a su variabilidad cultural?; por ejemplo, ¿puede producir un movimiento tipo “ola de avance” una distribución de la ocupación neolítica similar a la observable?; o ¿reproduce mejor el resultado un movimiento a saltos?; y sobre todo, ¿cómo podemos saberlo? Una forma de proceder a contrastar estos supuestos es simplemente obtener registros arqueológicos “virtuales” a partir de parámetros conocidos. Es decir, simular resultados controlando las variables que intervienen en los mismos.

Algunos trabajos ya han explorado el potencial de estas nuevas herramientas. Parisi y colaboradores (2009), utilizando un modelo basado en los Automatas celulares, han intentado reconstruir la variabilidad cultural resultante de una expansión demica, de acuerdo a ciertas reglas de transmisión. Su comparación con la variabilidad lingüística no parece ser una opción adecuada, dado que ésta nos es desconocida, excepto en tiempos

demasiado recientes. Este último aspecto ejemplifica la clase de problemas a los que se enfrenta la nueva metodología: encontrar indicadores arqueológicos adecuados y, además, controlar el tiempo, de manera que los resultados virtuales sean comprobables con los reales en tiempo similar.

Más recientemente se han tratado estos problemas en dos trabajos distintos. En uno (Bernabeu et al., 2015) el objetivo era abordar los patrones espacio-temporales de la aparición del Neolítico, utilizando para ello la información de la península Ibérica. El otro, aunque partía de los parámetros utilizados en el primero, pretende algo diferente: comprobar si la hipótesis del autoestop, propuesta por Ackland, puede ser corroborada. Este último está aún inédito, y forma parte del trabajo de tesis doctoral de S. Pardo Gordó (2015), por lo que haré referencia al mismo de forma limitada y contando con su permiso.

En el primero de los ejemplos se trataba de comprobar la existencia del gradiente cronológico en la aparición del Neolítico, medido como fecha de aparición de la agricultura y ganadería en cierto lugar. La cuestión, por tanto, consistía en aplicar la nueva metodología al clásico problema del frente de avance, generalmente tratado mediante modelos matemáticos. La información utilizada fue la misma que en aquellos: la variabilidad espacial (sitios neolíticos) y temporal (fechas C^{14}) de la aparición del Neolítico, si bien en este caso nos limitamos a la península Ibérica a fin de controlar mejor ambas variables.

De acuerdo con la hipótesis demica, el Neolítico debería aparecer primero en el mediterráneo. Con todo, resulta necesario señalar que los patrones resultantes no serían los mismos si el proceso obedecía a un movimiento tipo ola de la avance u a otro tipo *leap-frog*, con distancias de salto variables. Tampoco debieron ser idénticos los resultados si el proceso de expansión siguió una única vía (tradicionalmente, la costa noroccidental del mediterráneo) o si también se utilizó la vía norteafricana. Este último aspecto ha cobrado vigencia recientemente, si bien existen posiciones diferentes sobre su incidencia en el proceso de expansión neolítica (Manen, 2007; Bernabeu et al., 2009; Zilhão, 2014).

Como forma de enfocar el problema se diseñó un modelo, utilizando la plataforma NetLogo (Wilensky, 1999), basado tan sólo en la expansión demica, es decir, ignorando a propósito la existencia y posible incidencia de grupos mesolíticos. Es aquí donde mejor se observa una de las características de la modelización actual: lo que se pretende no es reconstruir el pasado, sino generar escenarios derivados de reglas controladas que puedan compararse con el registro arqueológico. A partir de aquí se consideraron los siguientes factores:

- *Ecología*. En este caso, se diseña un mundo real, en este caso la península Ibérica, dividido en parcelas de 5x5 km. Cada parcela posee un valor de productividad agrícola basado en la combinación de ciertas variables que afectan al rendimiento del trigo en la actualidad. El investigador puede elegir un límite (índice) por debajo del cual la ocupación de determinada celda no se producirá.

- *Movimiento*. Variación entre el Ola de Avance –cada agente en cada turno se mueve tan sólo a aquellas celdas vecinas, económicamente aptas para la agricultura y que no estén ocupadas–; y a saltos –variando aleatoriamente la distancia de salto entre 20 y 120 km, y manteniendo el resto de limitaciones similar.

- *Coste de ocupación*. Este indicador trata de medir la disminución en la capacidad de carga agrícola de cada celda que se produce tras su ocupación por los grupos de agricultores. De este modo se permite que una celda esté ocupada por más de un grupo. Su implementación trataba de valorar la incidencia de un modelo de acceso a los recursos basado en la Distribución Ideal Despótica.

- *Puntos de origen*. Se exploraron diversas posibilidades de inicio, ubicadas alrededor de la península Ibérica y en el centro, a fin de comprobar si una o varias de ellas explicaban igualmente bien los datos disponibles. Queda claro que, por ejemplo, si la hipótesis de un origen mediterráneo fuera correcta, las correlaciones obtenidas entre escenarios ubicados al Oeste, Norte o el Centro peninsular deberían obtener claramente peores ajustes con respecto al registro arqueológico.

La información arqueológica utilizada para contrastar los resultados está formada por los sitios y niveles con fechas correspondientes al primer Neolítico en cada celda de 5x5. Los datos no se interpolaron. La base de datos resultante se sometió a un proceso de evaluación que dio como resultado tres muestras arqueológicas distintas, elaboradas según diversas combinaciones a partir de las muestras utilizadas en la datación. De este modo se pretendía, también, valorar el efecto que sobre los resultados de cualquier modelo podría tener la utilización de muestras de vida larga, vida corta o directas. Así, se confeccionaron 4 muestras distintas:

- *Directas*. Sólo sitios con fechas obtenidas a partir de muestras de especies domésticas.

- *Cortas*. Además de las anteriores, se incluyen aquellos sitios con muestras de vida corta datadas (incluyendo conchas). Si un sitio se encuentra datado con muestras Directas y de Vida corta, se prefieren las primeras.

- *Mejores*: La fecha más antigua de cada sitio obtenida sobre muestras domésticas, vida corta o vida larga, por ese orden de preferencia.

- *Más Viejas*: La fechas más antigua de cada lugar, con independencia de la muestra datada.

Antes de proceder a realizar los experimentos, debíamos resolver una cuestión importante: ¿cómo comparar los resultados virtuales con los arqueológicos? Generalmente, esta cuestión

implica resolver primero la equivalencia temporal entre el modelo y la realidad. En nuestro caso, sin embargo, este aspecto no fue necesario. En lugar de proceder a escalar el tiempo virtual en relación con el tiempo real (años radiocarbono calibrados), procedimos a calcular el coeficiente de correlación de Pearson entre el número de tics (tiempo virtual) que el programa tardaba en alcanzar cada lugar con información arqueológica disponible, y la media de las fechas radiocarbono de esos mismos lugares (celdas). A mayor correlación negativa mejor ajuste entre el escenario virtual y la realidad arqueológica.

A partir de estos postulados se realizaron diversos experimentos. El primero consistió en valorar qué muestras arqueológicas se comportaban mejor y qué lugares de expansión inicial proporcionaban mejores resultados. Utilizando los valores de movimiento, distancia y coste de ocupación señalados en la tabla 1 se obtuvieron 340 escenarios, cada uno de los cuales se ejecutó 50 veces a fin de obtener valores estadísticos confiables. Sobre los valores medios de cada escenario se calculó el coeficiente de correlación simple (r) de Pearson, cuyos resultados permitieron observar:

- Que, efectivamente, las muestras utilizadas influyen en los resultados; de manera que en nuestro caso, las correlaciones más elevadas se obtuvieron siempre al comparar los escenarios con las muestras procedentes de dataciones directas (fig. 1).

- Y que, como era de esperar, los mejores puntos iniciales se ubican sistemáticamente en el Este y Sureste de España, lo que permitía confirmar el origen mediterráneo del Neolítico.

Aún con estos resultados, las correlaciones obtenidas en este experimento no eran demasiado elevadas, lo que sugería que las estrategias de movimiento, la demografía y/o el atractivo agrícola de las regiones (medido como capacidad para el cultivo del trigo), podían resultar determinantes. Asimismo, la posibilidad de que la ruta norteafricana fuera igualmente importante en la explicación del proceso no podía descartarse tampoco.

Por estas razones, se diseñó una segunda serie de experimentos. El primero de ellos iba destinado a conocer si la correlación entre escenarios virtuales y la realidad arqueológica mejoraba si, en lugar de un único punto de origen, se consideraban dos o más. Se trataba, en realidad, de simular una situación en la que el Neolítico llegara a la península Ibérica a la vez por el Norte (vía S de Francia) y por el Sur (vía N de África).

Tabla 1. Parámetros utilizados en el experimento 1.

<i>Estrategias de movimiento</i>	<i>Vecino a vecino</i>	<i>Leap-frog (saltos)</i>	<i>IDD (Distribución Ideal Despótica)</i>
<i>Distancia</i>	Celdas adyacentes sin ocupación y con valor agrícola adecuado.	Cualquier celda no ocupada en un radio de 5 (25 km).	La mejor de las celdas adyacentes.
<i>Límite agrícola</i>	0. Sin importancia. 3. Imposibilidad de expandirse a celdas con valor inferior al indicado.	0. Sin importancia. 3. Imposibilidad de expandirse a celdas con valor inferior al indicado.	3. Imposibilidad de expandir a celdas con valor inferior al indicado. El valor decrece a medida que la población aumenta vía la instalación de nuevos grupos.
<i>Demografía</i>	Sin importancia.	Sin importancia.	El valor agrícola de un celda decrece un 5% cuando un nuevo grupo se instala en ella.

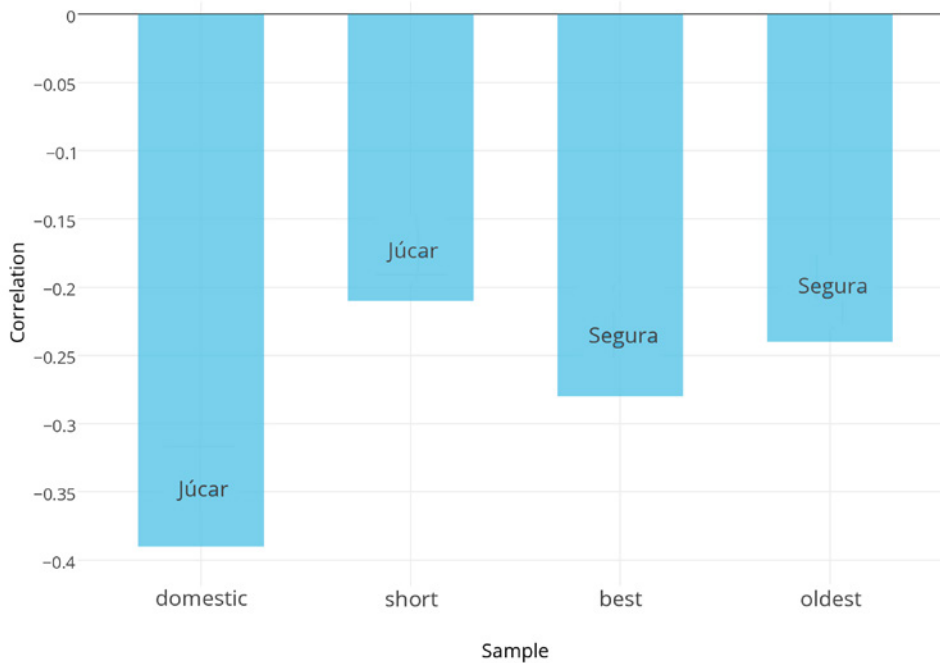


Fig. 1. Mejor ajuste (r de Pearson) entre los escenarios virtuales (con un solo punto de origen para la expansión del Neolítico) y los 4 tipos de muestras arqueológicas (fechas C14) utilizadas para su contraste (ver texto). Puede observarse claramente cómo las mejores correlaciones se obtienen cuando se utiliza la muestra formada por fechas obtenidas sobre elementos domésticos. En todos los casos, los mejores puntos de inicio se ubican al este de la península Ibérica.

Utilizando las mismas estrategias de movimiento que en el experimento anterior (tabla 1), se exploró sistemáticamente la adecuación de los distintos escenarios basados en diversas combinaciones del siguiente modo:

- Primero se originó un escenario utilizando todos los puntos de origen a un tiempo.

- A continuación se eliminaron, uno a uno, los distintos puntos de origen, evaluando su correlación con los datos arqueológicos. Si al sustraer un punto de origen, la correlación del escenario mejoraba, el punto de origen se descartaba; en caso contrario, se mantenía.

Los resultados obtenidos permitieron, en primer lugar, descartar la idea de que la correlación mejoraba a medida que aumentaban los puntos de origen.

Descendiendo al detalle, del conjunto de las combinaciones utilizadas diez escenarios mejoraban notablemente la correlación obtenida utilizando tan sólo un punto de origen. En cinco ellos, se encontraba presente el río Júcar; y los que obtenían una correlación mayor incluían puntos de origen en el Norte y Sur (fig. 2). Uno de ellos, además, incluía tres puntos de origen, ubicados al Norte (río Llobregat), en el Este (río Júcar) y en el Sur (Málaga).

¿Qué sugiere esta situación respecto al problema de la doble vía en la expansión del Neolítico? Ciertamente, la mejor correlación entre escenarios con dos y tres puntos de origen, respecto a cualquier otra posibilidad es compatible con una doble vía de entrada del Neolítico a la península Ibérica; aunque, por otra parte, tampoco cabe descartar que este patrón se originase como consecuencia de un movimiento tipo *leap-frog* extraordinariamente rápido, al menos en sus inicios, soportando así la sugerencia de Zilhão (2001).

Aunque parece claro que la combinación de varios puntos (2 ó 3) de origen, mejora la correlación, ahora situada en torno a -0.49 en el mejor escenario, quedaba por investigar la influencia

de las decisiones locales. Para ello se diseñó un experimento en el que utilizando el mejor escenario logrado en el experimento anterior, se variaron sistemáticamente el resto de las variables (coste de ocupación, un símil de IDD; distancia de salto, productividad agrícola de la parcela). De los más de 10.000 escenarios generados, sólo 28 mejoraban la correlación obtenida en el experimento anterior. Y de estos, sólo cuatro utilizaban un algoritmo de dispersión vecino-a-vecino (*wave of advance*) en su dispersión.

Asumiendo un inicio simultáneo en tres puntos (norte, centro y sur de la costa mediterránea), las mejores combinaciones eran aquellas basadas en un movimiento tipo *leap-frog*, con distancias de salto moderadas en cualquier dirección (entre 25-50 km); un coste demográfico entre moderado y alto (20-100%) y una preferencia por ocupar parcelas con índices de productividad medios (5 ó 6 sobre 10 como mínimo). Se trata, en buena medida, de un comportamiento pionero que facilita la colonización de regiones extensas sobre la base de ignorar aquellas con escaso atractivo agrícola y una tendencia a ocupar celdas desocupadas o con escasa población. Los tres de los mejores escenarios ilustran perfectamente esta situación. Su valor de ajuste con el registro arqueológico se situaba ahora entre -0.55 y -0.56.

Más allá de las conclusiones sustantivas que puedan derivarse del modelo (v. Bernabeu et al., 2015), lo que me interesa subrayar a partir de este ejemplo son algunos aspectos clave de esta metodología. En el discurso que sigue haré mención a algunos aspectos relativos al modelo implementado por S. Pardo (2015) en su tesis doctoral para investigar la incidencia de la demografía y la transmisión de la información en el patrón de variabilidad cultural del primer Neolítico en el Mediterráneo Occidental.

A estas alturas debe parecer evidente a través de las descripciones anteriores que la modelización no se utiliza para “reconstruir” el pasado, sino para explorarlo, manipulando siste-

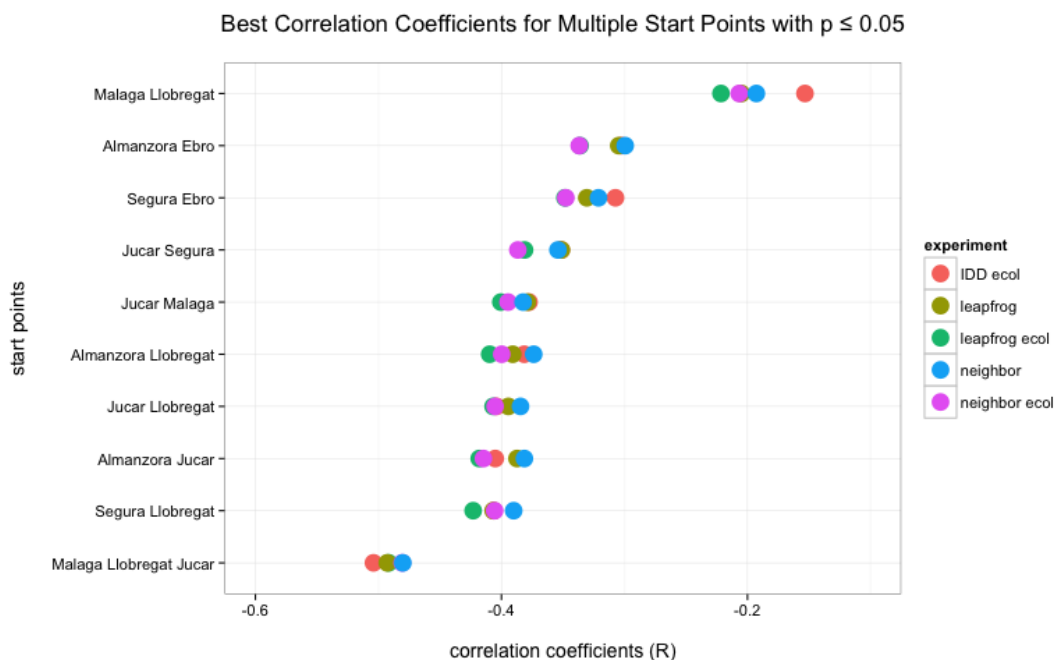


Fig. 2. Escenarios virtuales basados en dos o más puntos de origen que mejoran la correlación obtenida en el experimento anterior (ver fig. 1). De nuevo todos los puntos de origen se encuentran en la fachada mediterránea ibérica. Los mejores de entre ellos incluyen un movimiento a saltos (leap-frog) sobre parcelas con valores medios y/o altos de productividad agrícola (ecolog, IDD). Ver texto para más detalle.

máticamente los parámetros considerados “clave” para explicar el proceso de que se trate de manera que se obtienen diversos resultados (escenarios) posibles. En consecuencia, la cuestión importante es cómo comparar los escenarios virtuales con el registro arqueológico. Pero antes de enfrentar esta cuestión deberán resolverse algunos aspectos.

1. El primero es la elección de los **indicadores arqueológicos** adecuados al problema analizado. En el caso anterior, parece bastante evidente que la utilización de las coordenadas geográficas y fechas C^{14} constituyen indicadores adecuados si lo que se pretende es medir la dispersión del Neolítico: cuándo y dónde debería aparecer el primer Neolítico, de acuerdo a ciertas reglas.

Sin embargo, este aspecto resulta menos evidente si lo que se pretende es medir la variabilidad de la cultura material. Por ejemplo, si la hipótesis del Autoestopista expresada por Ackland es correcta, ¿qué efectos deberíamos esperar sobre el registro material de las primeras sociedades neolíticas en el Mediterráneo Occidental?, ¿qué indicadores arqueológicos podríamos utilizar?, y ¿cómo deberíamos medirlos?

La tesis doctoral de S. Pardo trata, justamente, de resolver estas preguntas. Para ello, partiendo de la base de un modelo de expansión similar al descrito anteriormente, se diseñó un modelo basado en agentes que incorporaba varias formas relativas a la transmisión de la información con diferentes tasas de mutación. De este modo, sobre la base de los postulados de la teoría evolutiva, pudieron generarse diversos escenarios que permitían evaluar si la variabilidad observada en los primeros conjuntos cerámicos en el MW podría o no explicarse mediante tres conjuntos de reglas que gobiernan la transmisión de

información, cada uno de ellos combinado con diversas tasas de mutación y tres clases de movimiento: vecino a vecino; y a saltos de 120 ó 150 km.

Siguiendo la estela de trabajos recientes (Bernabeu et al., en prensa) el autor propone utilizar la decoración cerámica, en concreto la técnica utilizada para confeccionarla, como posible indicador. Sobre los cómputos (recuentos) de cada región, se procedió a calcular un índice de similitud específicamente diseñado para tratar con esta clase de muestras.

Nótese que la unidad de recuento es diferente con respecto a la utilizada en el primer ejemplo. Ahora la información se agrupa por regiones con el fin de minimizar algunos de los problemas inherentes al registro arqueológico (*vide supra*). No se trata sólo de los problemas relacionados con el tamaño de la muestra, sino que aspectos como las prácticas arqueológicas (prospección, sondeos, excavaciones en área), o la funcionalidad de los sitios pueden introducir sesgos en la muestra presente en cada sitio.

Además, como se ha señalado en otra parte (Bernabeu et al., en prensa), el registro arqueológico suele ser acumulativo. Cada unidad arqueológica (un nivel, o el relleno de un pequeño silo) es el resultado de un proceso más o menos prolongado en el tiempo. Aunque los arqueólogos clasificamos varios de ellos dentro del mismo período (p.e., Neolítico Antiguo), esto no cambia que cada uno por separado tenga una duración diferente. Como consecuencia, se producirán variaciones en la cultura material de modo que resulta difícil esperar que se comporten del mismo modo en lo que atañe a la representatividad de su cultura material.

Una forma de minimizar el impacto de esta variación consiste en desarrollar estrategias adecuadas si queremos comparar unidades de muestreo distintas. A partir de experiencias

previas (Bernabeu et al., en prensa) el autor desarrolla una estrategia basada en ventanas temporales como forma de reunir las unidades observadas (niveles, silos, etc.) en conjuntos temporalmente definidos que agrupan períodos de 150 y 300 años, desde el inicio de la secuencia cerámica en cada región. La estrategia utilizada es acumulativa, de manera que un conjunto que ocupara la primera ventana temporal estaba también incluido en la segunda.

Lógicamente esta estrategia es mejorable. Una mayor finura sería posible si se dispusiera de mayor precisión en las dataciones y pudieran aplicarse métodos estadísticos apropiados para decidir la pertenencia de cualquier unidad a una de estas ventanas temporales. Los métodos basados en aproximaciones bayesianas pueden ser una forma adecuada de enfocar este problema. Su utilización, además, puede proporcionar una forma de incluir en el registro (ampliando la muestra disponible) aquellos conjuntos no datados, al estilo de las propuestas realizadas en otros ámbitos cronológicos (Fernández López de Pablo y Barton, 2014) y geográficos (Mills et al., 2013).

2. Tiempo Virtual vs. Tiempo Real. Necesitamos también transformar el tiempo del “ordenador” en tiempo real. En algunos casos, como pone de relieve el ejemplo de la expansión del Neolítico, este aspecto no tiene que ser explícito, de manera que no resulta necesario establecer la equivalencia entre pasos de la simulación (o ciclos) y años reales.

Ahora bien, en el segundo de los ejemplos citados, este aspecto sí debe acometerse con antelación: necesitaremos conocer cuántos años reales representa cada paso del modelo puesto que la información de salida deberá organizarse en las ventanas temporales (150 y 300 años) previamente establecidas; es decir, ¿cuántos pasos del modelo representan 150 años? En el modelo diseñado por S. Pardo (2015), este variaba entre aproximadamente 1 y 3 años por paso dependiendo del tipo de movimiento. Para llegar a esta conclusión simplemente se dividió el número medio de pasos que el modelo necesita para llegar a ciertos puntos (yacimientos con dataciones sobre elementos domésticos), por la media calibrada de la datación obtenida en ese mismo punto geográfico.

3. Resultados virtuales. También necesitamos una estrategia adecuada para recoger los resultados del modelo. Este aspecto depende, básicamente, de los objetivos que se pretenda evaluar y de la información disponible, lo que a su vez remite a la cuestión de qué indicadores arqueológicos son adecuados al proceso que se desea analizar.

Volviendo al primer ejemplo, el modelo disponía de un “mundo realista” dividido en parcelas de 5x5 km. La información arqueológica consistía en sitios datados y georeferenciados. En caso de coincidencia de dos sitios en la misma celda, sólo se conservó la información correspondiente al más antiguo de ellos. Con esta estructura de información, bastaba con recoger la información virtual correspondiente a cada celda con valores arqueológicos, ignorando el resto. Esto facilitaba los cálculos y ahorra tiempo de computación al limitar la recogida de la información a aquellas parcelas donde disponíamos información arqueológica.

En otras ocasiones esta estrategia no resulta útil. Así en el segundo de los casos comentados, se procedió a agrupar los sitios disponibles por regiones, de manera que la información recogida consistió en el cómputo medio acumulado de cada

técnica decorativa en cada región de la que se disponía de documentación arqueológica, ignorando el resto, y para cada ventana temporal definida de acuerdo con el número de pasos/años establecidos.

4. Virtual vs. Real (Arqueológico). Resuelto lo anterior, el último paso consiste en seleccionar métodos estadísticos que permitan evaluar el ajuste de los diversos escenarios obtenidos con la información empírica. En el primer caso expuesto, el coeficiente de correlación simple de Pearson entre los pasos del modelo para llegar a cada celda y la media de la datación C^{14} disponible para esa misma celda era un criterio suficiente. De este modo, una adecuación perfecta entre cualquier escenario y la realidad, debería arrojar una correlación negativa perfecta ($r = -1$). Cualquier resultado ≥ 0 debería desecharse por insatisfactorio.

En el segundo caso, la cuestión resultaba más compleja. Más allá de los detalles (que no corresponde explicar en el presente texto), el autor disponía de una muestra arqueológica formada por ciertas regiones caracterizadas cada una de ellas por un índice que medía su distancia cultural (diferencia en la proporción de técnicas decorativas presentes) a cualquiera de las demás. Asumiendo que la expansión se produjo desde el S de Italia, tan sólo había que comparar la distancia “cultural” respecto al S de Italia entre cada escenario virtual y el arqueológico. De nuevo se recurrió el coeficiente de correlación simple de Pearson para proceder a las comparaciones, asumiendo que a mayor correlación positiva mejor ajuste entre el modelo y la realidad. Sus resultados sugieren algunas cosas interesantes:

- Que la variabilidad de las cerámicas correspondientes al primer Neolítico puede perfectamente comprenderse, utilizando criterios de arqueología evolutiva, como consecuencia de una expansión desde el sur de Italia.

- Que implicaría un proceso de autoestop cultural (copia sin cambios durante la primera colonización) seguida por procesos de transmisión de la información basados tanto en la copia aleatoria (Drift) como sesgada (copiando el más común o el más antiguo, dentro de cierto radio), si bien con ratios de mutación diferentes en cada caso.

En coincidencia con el modelo de dispersión, los mejores resultados se obtenían si la dispersión se producía mediante un movimiento tipo *leap-frog*, lo que en mi opinión refuerza la coherencia de los resultados de ambos.

En resumen, los nuevos métodos basados en la simulación (sean estos modelos de agentes, autómatas celulares o redes) pueden proporcionar herramientas muy útiles a una disciplina que, como la nuestra, intenta comprender las dinámicas de cambio a largo plazo, aunque no puede observarlas directamente. Junto con la teoría de complejidad, y la teoría evolutiva, y la simulación computacional como método, pueden resultar en una combinación teórico-metodológica valiosa. Sin embargo, son diversos los retos que deben acometerse para poner a punto estas herramientas. En las páginas anteriores me he centrado básicamente en uno de ellos: las limitaciones inherentes al registro arqueológico. Necesariamente debemos comprenderlas y actuar en consecuencia a fin de evitarlas, minimizarlas y, lo que resulta más interesante, utilizarlas de forma adecuada a los requisitos derivados de la simulación computacional.

BIBLIOGRAFÍA

- ACKLAND, G.J.; SIGNITZER, M.; STRATFORD, K. y COHEN, M.H. (2007): "Cultural hitchhiking on the wave of advance of beneficial technologies". *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 104, p. 8714-8719.
- AMMERMAN, A.J. y CAVALLI-SFORZA, L.L. (1984): *The Neolithic transition and the genetics of populations in Europe*. Princeton University Press, Princeton.
- BALSERA, V.; DÍAZ DEL RÍO, P.; GILMAN, A.; URIARTE, A. y VICENT, J.M. (2015): "Approaching the demography of late prehistoric Iberia through summed calibrated date probability distributions (7000-2000 BC)". *Quaternary International*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.06.022>.
- BANKES, S.; LEMPERT, R. y POPPER, S. (2002): "Making Computational Social Science Effective: Epistemology, Methodology, and Technology". *Social Science Computer Review*, 20 (4), p. 377-388.
- BARTON, C.M. (2014): "Complexity, Social Complexity, and Modeling". *Journal of Archaeological Method and Theory*, 21, p. 306-324. DOI: 10.1007/s10816-013-9187-2.
- BARTON, C.M.; ILLAH, I.T.; BERGIN, S.M.; MITSATOVA, H. y SARGOUGHIAN, H. (2012): "Looking for the future in the past: Long-term change in socioecological systems". *Ecological Modeling*, 241, p. 42-53.
- BERNABEU AUBÁN, J.; MOLINA BALAGUER, L.; ESQUEMBRE, M.A.; ORTEGA, J.R. y BORONAT, J.D. (2009): "La cerámica impresa mediterránea en el origen del Neolítico en la península Ibérica". En *De Méditerranée et d'ailleurs... Mélanges offerts à Jean Guilaine*. Archives d'Écologie Préhistorique, Toulouse, p. 83-96.
- BERNABEU AUBÁN, J.; MORENO MARTÍN, A. y BARTON, C.M. (2012): "Complex Systems, Social Networks and the evolution of Social Complexity". En M. Cruz Berrocal, L. García Sanjuán y A. Gilman (eds.): *The Prehistory of Iberia: Debating Early Social Stratification and the State*. Routledge, London y New York, p. 23-37.
- BERNABEU AUBÁN, J.; GARCÍA PUCHOL, O.; PARDO GORDÓ, S.; McCLURE, S.B. y BARTON, C.M. (2014): "Socioecological dynamics at the time of Neolithic transition in Iberia". *Environmental Archaeology*, 19 (3), p. 214-225.
- BERNABEU AUBÁN, J.; BARTON, C.M.; BERGIN, S. y PARDO GORDÓ, S. (2015): "Modeling initial Neolithic dispersal. The first agricultural groups in West Mediterranean". *Ecological Modeling*, 307, p. 22-31.
- BERNABEU AUBÁN, J.; MANEN, C. y PARDO GORDÓ, S. (en prensa): "Spatial and temporal diversity during the Neolithic spread in western Mediterranean. The first pottery productions". En O. García Puchol y D.C. Salazar-García (eds.): *Time of Neolithic transition along the western Mediterranean*. Springer Fundamental Issues in Archaeology.
- BERNABEU AUBÁN, J.; GARCÍA PUCHOL, O.; BARTON, C.M.; McCLURE, S.B. y PARDO GORDÓ, S. (en prensa): "Radiocarbon dates, climatic events and social dynamics during the Early Neolithic in Iberia". doi:10.1016/j.quaint.2015.09.020.
- BOCQUET-APPEL, J.P. (2002): "Paleoanthropological traces of Neolithic demographic transition". *Current Anthropology*, 43, p. 638-650.
- BRUGHMANS, T. (2012): "Thinking through networks: a review of formal network methods in archaeology". *Journal of Archaeological Method and Theory*, DOI: 10.1007/s10816-012-9133-8.
- CREMA, E.R.; KERIG, T. y SHENNAN, S. (2014): "Culture, space, and metapopulation: a simulation-based study for evaluating signals of blending and branching". *Journal of Archaeological Science*, 43, p. 289-298.
- DEBOER, W.R.; KINTIGH, K. y ROSTOKER, A.G. (1996): "Ceramic seriation and site reoccupation in lowland South America". *Latin American Antiquity*, 7 (3), p. 263-278.
- GILBERT, N. y TROITZSCH, K.G. (2005): *Simulations for the social scientist*. Open University Press, Berkshire, UK.
- GRONENBORN, D. (2010): "Climate, Crises, and the Neolithisation of Central Europe between IRD-events 6 and 4". En D. Gronenborn y J. Petrasch (eds.): *The Spread of the Neolithic to central Europe. International Symposium, Mainz 24 June - 26 June 2005*. Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums, Mainz, p. 61-81.
- MILLER, J.H. y PAGE, S. (2007): *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton University Press, Princeton.
- MILLS, B.J.; CLARK, J.J.; PEEPLES, M.A.; HAAS Jr., W.R.; ROBERTS Jr., J.M.; HILL, J.B.; HUNTLEY, D.L.; BORCKA, L.; BREIGERE, R.L.; CLAUSET, A. y SHACKLEY, M.S. (2007): "Transformation of social networks in the late pre-Hispanic US Southwest". *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 110, p. 5785-5790.
- MITCHELL, M. (2009): *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press, New York, USA.
- MANEN, C. (2007): "La production céramique de Pont de Roque-Haute: synthèse et comparaisons". En J. Guilaine, C. Manen y J.-D. Vigne (dirs.): *Pont de Roque-Haute (Portiragnes, Hérault). Nouveaux regards sur la néolithisation de la France méditerranéenne*. Archives d'écologie préhistorique, Toulouse, p. 151-166.
- NEWMAN, M.E.J. (2010): *Networks: An introduction*. Oxford University Press, Oxford.
- PARDO GORDÓ, S. (2015): *La diversidad cultural del primer Neolítico en el mediterráneo occidental. Un análisis desde los sistemas complejos y la simulación basada en agentes*. Tesis Doctoral, Universitat de València.
- PARISI, D.; ANTINUCCI, F.; NATALE, F. y CECCONI, F. (2008): "Simulating the expansion of farming and the differentiation of European languages". En B. Lacks (ed.): *Origin and Evolution of Languages: Approaches, Models, Paradigms*. Equinox, London, p. 234-258.
- ROSENWIG, R.M. (2000): "Some Political Processes of Ranked Societies". *Journal of Anthropological Archaeology*, 19 (4), p. 413-460.
- SHENNAN, S.; DOWNEY, S.; TIMPSON, A.; EDINBOROUGH, K.; COLLEDGE, S.; KERIG, T.; MANNING, K. y THOMAS, M. (2013): "Regional population collapse followed initial agricultural booms in mid-Holocene Europe". *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms3486.
- WASSERMAN, S. y FAUST, K. (1994): *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge.
- WILENSKY, U. (1999): *NetLogo*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- ZILHÃO, J. (1993): "The spread of agro-pastoral economies across Mediterranean Europe: a view from the far west". *Journal of Mediterranean Archaeology*, 6, p. 5-63.
- ZILHÃO, J. (2014): "Early Prehistoric Navigation in Western Mediterranean. Implications for the Neolithic Transition of Iberia and the Maghreb". *Eurasian Prehistory*, 11 (1-2), p. 185-200.
- ZILHÃO, J. (2001): "Radiocarbon evidence for maritime pioneer colonization at the origins of farming in west Mediterranean Europe". *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 98, p. 14180-14185.