

Análisis de patrones espaciales de puntos para el estudio de tendencias de localización en distribuciones de yacimientos arqueológicos

Spatial Point Pattern Analyses for the Study of Locational Trends in Archaeological Site Distributions

Miguel Carrero Pazos
Universidad de Oviedo
<https://orcid.org/0000-0001-9203-9954>
carreromiguel@uniovi.es

Recibido: 19/07/2022; Revisado: 24/12/2022; Aceptado: 09/01/2023

Resumen

Los análisis espaciales de puntos son herramientas estadísticas con grandes posibilidades de aplicación en la Arqueología del territorio y del paisaje. En este trabajo introducimos y discutimos algunos conceptos, enfoques y métodos principales, así como ejemplificamos su aplicación en un caso de estudio particularmente conocido del Megalitismo del Noroeste peninsular, como es el fenómeno tumular y megalítico de A Serra do Barbanza.

Palabras clave: Arqueología computacional, túmulos megalíticos, Serra do Barbanza, R Statistics.

Summary

Spatial point patterns are statistical tools with great potential for territorial and landscape archaeology. In this paper we introduce and discuss some of the most current concepts, approaches and methods, as well as demonstrate their application to a particularly well-known case study stemming from the megalithic complex in northwest Iberia, such as the Serra do Barbanza's clusters of tumuli and megaliths.

Keywords: Computational Archaeology, Megalithic Mounds, Serra do Barbanza, R Statistics.

1. INTRODUCCIÓN

La Arqueología computacional vive en la actualidad un renovado *momentum*. Con una dilatada tradición, los primeros trabajos de esta subdisciplina se desarrollaron en la década de los 1960 y 1970, sufriendo un renacimiento en la de los 1990 y un impulso evidente a partir del cambio de siglo con el desarrollo de la era informática. Esta evolución, dispar en profundidad e importancia dependiendo del país en cuestión, nos ha llevado en tiempos actuales hacia una auténtica renovación metodológica de la disciplina. Gracias a la proliferación de estudios y proyectos que rescatan viejos procedimientos analíticos y los reorientan mediante la aplicación de técnicas estadísticas, como la simulación basada en agentes, la Arqueología parece estar recuperando un giro cuantitativo tanto en términos epistemológicos como ontológicos (LAKE, 2014; KRISTIANSEN, 2015).

Este trabajo se compone de tres partes. En primer lugar, se exponen las bases de una de las corrientes de investigación más actuales en Arqueología computacional del territorio y paisajes pretéritos, como es el análisis de patrones de puntos. En segundo lugar, se explican varios métodos y enfoques que pueden utilizarse para estudiar, mediante simulaciones espaciales de puntos, ciertas dinámicas de poblamiento humano en el pasado, como por ejemplo criterios de localización, cuestiones de territorialidad, etc. Por último, con el objetivo de evidenciar la aplicación de los métodos descritos, se propone un breve caso de estudio en torno al fenómeno tumular y megalítico del Noroeste peninsular: la asociación de túmulos megalíticos y el tránsito potencial por el paisaje en las concentraciones megalíticas de A Serra do Barbanza (Galicia, Noroeste de la Península Ibérica). El objetivo principal de este caso de estudio no es tanto profundizar en las dinámicas prehistóricas del fenómeno sino servir como ejemplo de las posibilidades de aplicación de los métodos que a continuación se explican.

2. SIMULACIÓN Y MODELOS COMPUTACIONALES PARA EXPLORAR PATRONES Y PROCESOS ESPACIALES

En Arqueología, un modelo o simulación computacional puede ser entendido como la simplificación de una situación particular, un objeto, un paisaje, proceso o dinámica social que se utiliza para mejorar nuestro conocimiento sobre la realidad que representa (EPSTEIN, 2008; O'SULLIVAN y PERRY, 2013). Los modelos científicos pueden ser de muy diverso tipo, como conceptuales, físicos, matemáticos, empíricos o de simulación. Frecuentemente en forma de modelos computacionales, las simulaciones estadísticas en Arqueología han sido utilizadas para entender el comportamiento humano a largo plazo, analizar dinámicas observadas en el registro arqueológico, como procesos posdeposicionales, de incertidumbre cronológica, decisiones, criterios y factores que han podido influir en la localización de los yacimientos arqueológicos, o evaluar hipótesis a través de modelos matemáticos que buscan reproducir ciertas dinámicas y condiciones medioambientales del pasado (por ejemplo RUBIO-CAMPILLO *et al.*, 2012; SHENNAN

et al., 2013; BEVAN *et al.*, 2013; BALBO *et al.*, 2014; EVE y CREMA, 2014; CREMA, 2020). De entre las aplicaciones más importantes del uso de modelos de simulación en Arqueología destaca la evaluación de hipótesis. Tal y como reconoce X. Rubio-Campillo (2017: 54), la simulación permite modelar procesos de interacción social y, de manera aún más relevante, hacerlo como dinámicas espaciales y temporales. Esta habilidad se complementa por el hecho de que, al tratarse de un modelo formal, es posible comparar los resultados de la simulación con la evidencia arqueológica de manera directa a través de métodos cuantitativos. De esta forma, las investigaciones basadas en la simulación se convierten en sí mismas en contextos explicativos, puesto que su objetivo es describir y conocer las propiedades espaciales de un conjunto de yacimientos arqueológicos y, por extensión, las dinámicas de poblamiento del pasado (WIEGAND y MOLONEY, 2014).

La exploración estadística de patrones y procesos espaciales es particularmente popular en disciplinas como la biología, ecología, geografía, epidemiología o criminología (DIGGLE, 1983; BAILEY y GATRELL, 1995; DALE, 1999; FOTHERINGHAM *et al.*, 2000; ILLIAN *et al.*, 2008; DIGGLE, 2014). En Arqueología, aplicaciones pioneras pueden encontrarse en los años setenta del siglo pasado (DACEY, 1973; Whallon, 1974), aunque recientemente han adquirido un renovado impulso gracias a la disponibilidad de técnicas y aplicaciones de simulación estadística (BEVAN *et al.*, 2013; EVE y CREMA, 2014: 271).

Desde un punto de vista general, un patrón es cualquier regularidad observada sobre un espacio físico o temporal, en la naturaleza o en un objeto determinado. Es decir, los patrones son tendencias observables que podemos describir con números y modelos de datos (LAWTON, 1999: 178). En el caso que ocupa a este trabajo, sobre estadística espacial, los patrones pueden definirse como aquellas características que determinan la disposición espacial de ciertos objetos en el espacio; disposición que viene dada por las relaciones con objetos cercanos o tendencias provocadas por factores externos a los objetos analizados. Por otra parte, los patrones contienen información de la organización interna del sistema u objetos específicos que definen, aunque de una forma «codificada» (O'SULLIVAN y PERRY, 2013: 30). Describiendo la estructura del patrón podemos llegar a definir las relaciones que caracterizan al objeto, sistema o proceso que ha dado lugar a dicho patrón, es decir, sus propiedades espaciales (Fig. 1).

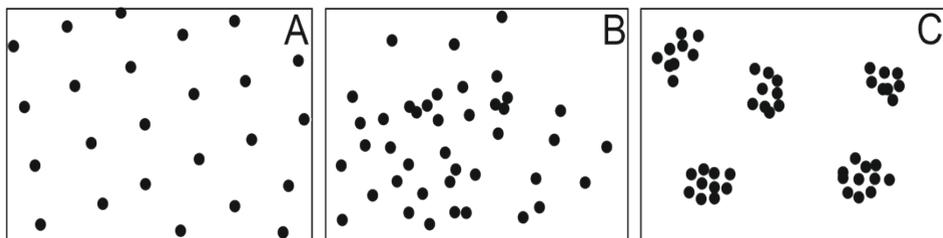


Figura 1. Diferentes tipos de patrones espaciales de puntos. A: Regular. B: Aleatorio. C: Agrupado.

En Arqueología, un yacimiento o un conjunto de yacimientos arqueológicos puede representarse mediante un punto o varios, denominados formalmente en lenguaje estadístico como *eventos*. Un conjunto de *eventos* dará lugar a un conjunto de puntos o localizaciones cartografiables mediante coordenadas x e y en un espacio determinado (área de estudio) (Fig. 2).

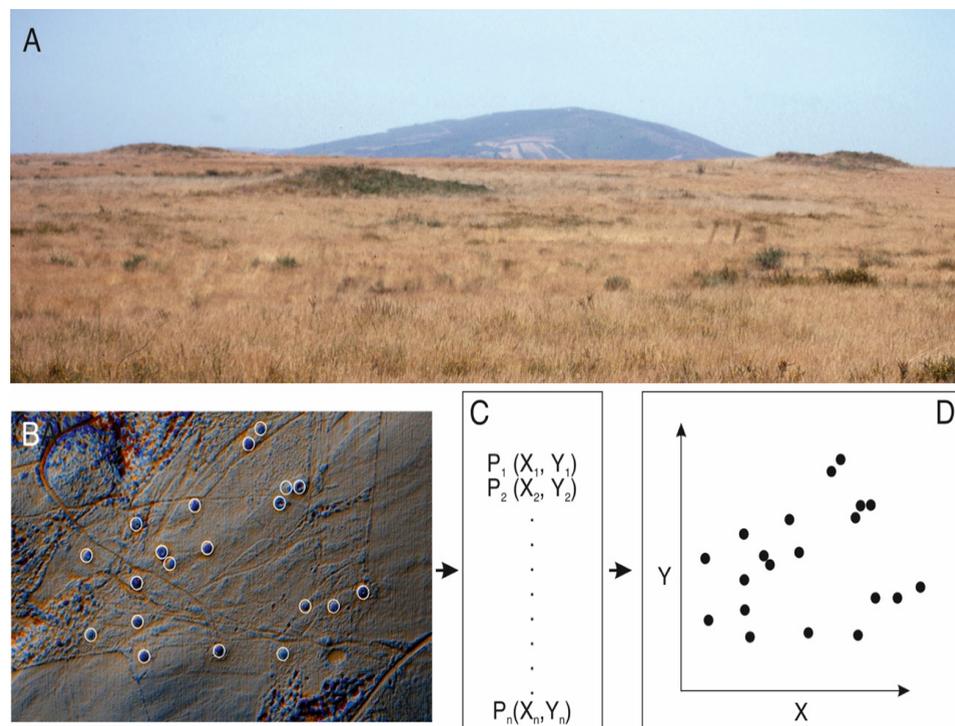


Figura 2. De la cartografía arqueológica al patrón de puntos. A: Túmulos megalíticos de la necrópolis de Santa Mariña (Lugo, Galicia). B: Modelo Digital del Terreno realizado con datos LiDAR del Instituto Geográfico Nacional (PNOA-IGN), con visualización microtopográfica *resampling filter* (SAGA GIS) e indicación de los túmulos megalíticos del sector central de la necrópolis (círculos blancos). C: Listado de los *eventos*. D: Confección del patrón de puntos (montaje de la figura basado en BEN-SAID, 2021: 3).

Estudiar la estructura y propiedades espaciales de un conjunto de yacimientos arqueológicos es interesante porque nos permite dilucidar su comportamiento y significados territoriales. Es evidente que la localización de un poblado de la Edad del Hierro, por ejemplo, nunca es aleatoria, y responde una serie de criterios específicos tomados en su momento por la sociedad que lo habitó. Algunos de estos criterios son sencillos de analizar, caso de la topografía o la proximidad a fuentes de aprovisionamiento de materia prima o agua. Pero otros, como la posible territorialidad o competitividad entre poblados coetáneos son más

difíciles de modelar desde un punto de vista cuantitativo.

La importancia de la localización de un yacimiento arqueológico viene dada, por tanto, por su significado espacial, que se deriva de las decisiones y criterios seguidos por la sociedad en cuestión a la hora de escoger su particular localización (PARCERO OUBIÑA y FÁBREGA ÁLVAREZ, 2006). En la mayor parte de las casuísticas prehistóricas (por ejemplo, pensemos en la localización de las cuevas paleolíticas o de megalitos), estos criterios son bien conocidos y la bibliografía sobre estos particulares suele ser extensa, por lo que una buena forma de comenzar un trabajo cuantitativo es realizar un trabajo de transformación de esos criterios en variables cuantificables con herramientas tipo SIG (localización en promontorios naturales = mapa de prominencia topográfica) (CHISHOLM, 1962; HAGGETT, 1976; KVAMME, 2020). Aunque normalmente en estos trabajos se prime el estudio de aquellos factores que pueden convertirse de forma sencilla en variables raster, sobre todo aquellos que, por definición, no han mudado drásticamente con el paso del tiempo (caso de algunas variables medioambientales), en la actualidad nuevos caminos analíticos permiten aproximarse a la cartografía de variables de tipo cultural (véase, por ejemplo, NÜSSLEIN *et al.*, 2020).

2.1. Los efectos de primer orden

Los efectos de estas variables externas en la disposición de una distribución de puntos se denominan *efectos de primer orden*, y se concretan en aquellos procesos o fenómenos externos que provocan que la intensidad de la distribución de puntos (yacimientos) varíe entre diferentes zonas del área de estudio considerada, como pueden ser ciertas variables medioambientales o espaciales (O'SULLIVAN y UNWIN 2003; BEVAN *et al.*, 2013: 31). En Arqueología, una de las formas más utilizadas para valorar la importancia de variables de primer orden en la confección de patrones de distribución de yacimientos arqueológicos es la regresión logística o el modelado predictivo, tema con larga tradición de aplicación y estudio (WARREN, 1990; WARREN y ASCH, 2000; CONOLLY y LAKE, 2009; VERHAGEN y WHITLEY, 2011, 2020). También es frecuente analizar la densidad (o intensidad) del emplazamiento de yacimientos arqueológicos atendiendo a ciertas variables medioambientales. Es decir, se trata de observar si una variable medioambiental puede interpretarse o no como un factor que explica la ubicación específica de ciertos yacimientos arqueológicos. Para ello puede utilizarse la función *rho*hat del paquete *Spatstat* (BADDELEY *et al.*, 2015), en *R Statistics*. Se trata de una estimación de la intensidad de un evento determinado (por ejemplo, un conjunto de castros), en función de una variable espacial (por ejemplo, la altitud). El método se concreta, según A. BADDELEY *et al.*, (2015: 180), en la generación de un gráfico de la función de yacimientos estimada $\rho(z)$ frente a los valores de una covariable z , bajo un intervalo de confianza del 95% de significación. Es decir, con la función *rho*hat podemos estimar la correlación entre la densidad (o intensidad) de un conjunto de yacimientos arqueológicos y una determinada variable espacial o medioambiental. Para ejemplificar el uso de esta función traemos a colación un ejemplo de nuestras propias investigaciones

en los túmulos megalíticos de Monte Penide (sur de Galicia) (CARRERO-PAZOS *et al.*, 2019). En el trabajo citado se concluye la existencia de una relación relevante entre la localización de estos monumentos funerarios y los ejes de convergencia de cuencas hidrográficas regionales, con un conjunto de monumentos megalíticos (121) que en tiempos prehistóricos desempeñó funciones funerarias, pero posiblemente también de demarcación territorial. De entre otras variables que se analizan en dicho trabajo, la asociación con los ejes de las cuencas hidrográficas es, de hecho, la que mejor explica la distribución actual de los túmulos en el paisaje, y una forma de comprobar dicha asociación es mediante la aplicación de la función *rho**hat*. En la Fig. 3 reproducimos la cartografía generada en ese trabajo para mostrar la distancia a los ejes de las cuencas en la región de Monte Penide (Fig. 3A), observando que la mayor parte de los monumentos megalíticos se localizan sobre dichos ejes. En la Fig. 3B aplicamos la función *rho**hat* para valorar, gráficamente, la influencia de dicha variable sobre la explicación del patrón actual de túmulos megalíticos. Los monumentos, mostrados como líneas verticales en el eje X, se agrupan a menos de 250 metros de los ejes de las cuencas, y observamos que la densidad de éstos aumenta en áreas próximas a dichos ejes, aspecto que podemos corroborar si cartografiamos la intensidad de sitios megalíticos utilizando como base dicha variable (Fig. 3C).

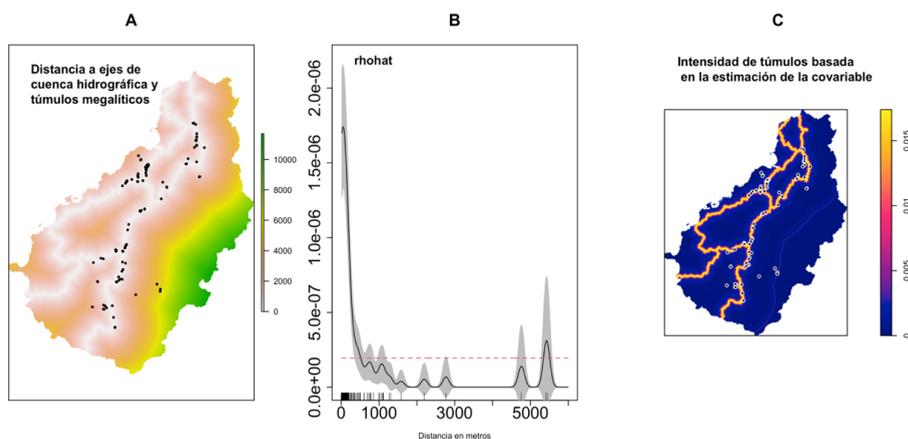


Figura 3. Resultados de la función *rho**hat* para valorar la asociación entre túmulos megalíticos del sur gallego (región de Monte Penide) y la distancia a los ejes de cuenca hidrográfica. A: Cartografía de la distancia a los ejes de cuenca hidrográfica. B: Función *rho**hat*. C: Intensidad de túmulos basada en la distancia a ejes de cuenca hidrográfica (modificado de CARRERO-PAZOS *et al.*, 2019).

2.2. La interacción entre puntos. Los efectos de segundo orden

Además de los efectos de primer orden, en el trabajo con patrones de puntos es necesario distinguir también los denominados *efectos de segundo orden*: las relaciones o interacciones entre los propios puntos. Suelen analizarse mediante pruebas estadísticas que buscan discernir patrones entre las distancias existentes en la distribución de puntos (NAKOINZ y KNITTER, 2016). Los efectos de segundo orden describen la intensidad relativa de los puntos influenciada por la configuración espacial de otros puntos del área de estudio (BEVAN *et al.*, 2013: 31), con lo que permiten valorar la existencia de fenómenos espaciales de dependencia en la red de puntos, como agregación, regularidad o repulsión. Por ejemplo, una distribución de poblados que refleje tendencias de competitividad y control territorial probablemente mostrará regularidad entre sus *eventos*, pues es lógico pensar que los poblados puedan tener un área de influencia o control similar entre ellos (WIEGAND y MOLONEY, 2014). Para estudiar los efectos de segundo orden es frecuente recurrir a análisis del tipo vecino más próximo o las funciones K y derivadas, como la función de correlación par (NAKOINZ y KNITTER, 2016; BEVAN, 2020). En relación con esto hay destacar el uso de los denominados «modelos nulos», que han tenido especial aplicación en la Arqueología espacial en los últimos años (O’SULLIVAN y PERRY, 2013; EVE y CREMA, 2014; BEVAN, 2020). Se trata de un tipo de modelos muy útiles para estudiar y comparar la estructura de un patrón de puntos determinado. En términos simples, un modelo nulo es un modelo espacial de referencia o estadísticamente conocido sobre el que compararemos aquel extraído de los datos arqueológicos. El más utilizado es, sin lugar a duda, el modelo de aleatoriedad espacial completa (*Complete Spatial Randomness*, CSR) (RIPLEY, 1981; DIGGLE, 1983). Este modelo asume que el proceso que ha generado la distribución de los puntos es de tipo *Poisson* (aleatorio) y homogéneo, con una intensidad λ constante a través de la totalidad del área de estudio. Sin embargo, resulta interesante destacar que podemos generar otro tipo de modelos bajo parámetros estadísticos conocidos cuyos procesos y patrones subyacentes hayan sido creados, por ejemplo, bajo la influencia de ciertas variables espaciales; o modelos que fuercen a los puntos que los componen a responder a procesos de segundo orden, como la repulsión o la atracción (BEVAN *et al.*, 2013; BEVAN, 2020). De esta forma podemos crear modelos explicativos que se convierten en herramientas comparativas muy útiles en Arqueología, por cuanto nos permiten simular patrones, situaciones o decisiones espaciales específicas del pasado. De hecho, la comparación directa de este tipo de modelos (de procesos de puntos) con los datos arqueológicos observados es, ciertamente, un camino muy interesante para intentar definir patrones y procesos espaciales inherentes a las distribuciones de yacimientos arqueológicos (EVE y CREMA, 2014). Las investigaciones de este tipo son, de facto, contextos explicativos propiamente dichos, porque el objetivo es tratar de identificar las propiedades del patrón de los datos observados (WIEGAND *et al.*, 2009; WIEGAND y MOLONEY, 2014: 22).

3. Caso de estudio. Los túmulos megalíticos de A Serra do Barbanza y el tránsito por el paisaje

Una de las concentraciones megalíticas del Noroeste peninsular con mayor tradición de investigación es la que se localiza en las penillanuras de A Serra do Barbanza (sobre los 400 m.s.n.m.) que, alberga, en la actualidad, un conjunto funerario de 38 monumentos tumulares y megalíticos (Fig. 4).

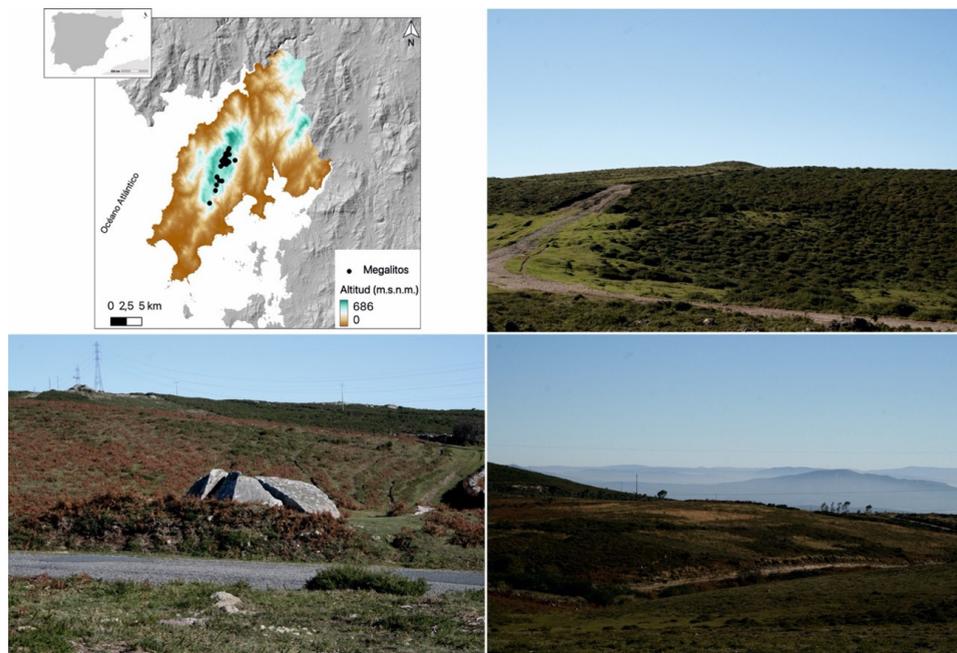


Figura 4. Localización geográfica de A Serra do Barbanza (Noroeste de la Península Ibérica), junto a la fotografía de uno de sus túmulos megalíticos, el dolmen de Casota do Páramo y el paisaje de penillanura característico de la zona. Fotografías del autor.

Desde las pioneras investigaciones de Florentino López Cuevillas y Fermín Bouza Brey en las décadas de 1920 y 1930, las concentraciones de monumentos tumulares y megalíticos del Barbanza fueron objeto de múltiples investigaciones e intervenciones arqueológicas (AGRAFOXO PÉREZ, 1986; CRIADO BOADO *et al.*, 1986; CRIADO BOADO y VILLOCH VÁZQUEZ, 2000). Algunos de estos trabajos, sobre todo aquellos realizados desde la óptica de la Arqueología del paisaje, centraron su atención en las concentraciones megalíticas de la parte alta de la sierra (conocida como *As Chans do Barbanza*), aunque hoy sabemos que dicha agrupación es minoritaria y existe un mayor número de monumentos localizados en las plataformas costeras (BUSTELO ABUÍN *et al.*, 2017; BARBEITO POSE *et al.*, 2015, 2018).

En los últimos años, el megalitismo del Barbanza fue también objeto de

diferentes estudios con metodologías espaciales, como los Sistemas de Información Geográfica y la estadística espacial, buscando definir las principales tendencias en la localización de dichas concentraciones monumentales. Así, el trabajo de M. LLOBERA (2015) se ocupa, entre otras cosas, de llamar la atención sobre la relación espacial entre el tránsito por el paisaje y los monumentos, cuestión ya señalada por investigaciones anteriores (cfr. CRIADO BOADO y VILLOCH VÁZQUEZ, 2000) y confirmada en los trabajos cuantitativos de C. RODRÍGUEZ RELLÁN y R. FÁBREGAS VALCARCE (2015, 2019). Junto a estos, la aportación de J. BUSTELO ABUÍN *et al.*, (2017) define, en términos cuantitativos, las bases de la localización del fenómeno megalítico en la zona. Concluye que los túmulos y megalitos se localizan en espacios abiertos, pero de relativa prominencia visual y que probablemente fue la pendiente, y no la altitud, el factor que configuró la particular distribución de monumentos por las plataformas costeras y topografías elevadas, dejando aquellas zonas intermedias con vacíos monumentales (cfr. CRIADO BOADO, 1988). Un trabajo que fue continuado y completado posteriormente con la adenda de otros factores, caso de la proximidad de los monumentos a zonas de ruptura de cuenca hidrográfica (CARRERO-PAZOS *et al.*, 2020). Todo ello parece indicar una suerte de «juego locacional», donde ciertamente la visibilidad y proximidad a rutas de tránsito son factores que parecen haber desempeñado un papel relevante en la configuración inicial de estos paisajes funerarios y monumentales.

En el caso específico de este trabajo, nos centraremos en mostrar cómo las herramientas estadísticas anteriormente explicadas nos permiten continuar estudiando criterios y factores de localización ya analizados en investigaciones previas, observando hasta qué punto el patrón espacial de la actual distribución de monumentos megalíticos en *As Chans do Barbanza* puede ser explicado atendiendo al movimiento pedestre teórico por la sierra. Existen, sin embargo, toda una serie de comentarios iniciales que vemos necesario indicar. En este trabajo utilizamos el término «túmulo megalítico» o «monumento megalítico» para englobar indistintamente aquellas estructuras que puedan poseer, o no, evidencia arqueológica de cámara megalítica. Por otra parte, la falta de excavaciones arqueológicas y de un programa de dataciones absolutas en el conjunto monumental de *As Chans do Barbanza* no permite, en la actualidad, reconstruir la escala temporal de las estructuras que a continuación estudiaremos. Algunas propuestas previas han señalado la existencia de dos momentos temporales (temprano/reciente) a partir del patrón espacial de los monumentos, aunque dicha cronología se basa más en supuestos teóricos que en investigaciones arqueológicas contrastadas (cfr. CRIADO-BOADO y VUELTA-SANTÍN 2017). No es descabellado pensar que podríamos estar ante un conjunto funerario y monumental con amplia temporalidad, algo esperable si observamos necrópolis tumulares y megalíticas bien conocidas como la de A Serra da Aboboreira, en Portugal (JORGE, 1991). Por último, no debemos olvidar que la distribución de monumentos tumulares y megalíticos de *As Chans do Barbanza*, que en la actualidad cuenta con 38 monumentos tras las investigaciones del Grupo de Estudios para la Prehistoria del Noroeste Ibérico, GEPN-AAT (BARBEITO POSE *et al.*, 2018; BUSTELO ABUÍN *et al.*, 2017; CARRERO-PAZOS *et al.*, 2020), puede no corresponderse con la existente en tiempos prehistóricos, habida cuenta de

las múltiples destrucciones de monumentos sucedidas en tiempos históricos (atestiguadas en las fuentes escritas, cfr. MARTINÓN-TORRES, 2001), y aquellas otras que continúan sucediendo en la actualidad (cfr. RODRÍGUEZ CASAL, 2010).

3.1. Modelando el tránsito por el paisaje: rutas óptimas

Utilizando como base la experiencia de trabajos anteriores (véase por ejemplo LLOBERA, 2015; CARRERO-PAZOS, 2018, 2021; RODRÍGUEZ RELLÁN y FÁBREGAS VALCARCE, 2019), se crearon dos modelos de rutas óptimas combinando GRASS GIS (versión 7.8) y R Statistics (versión 4.1.1), basados únicamente en la pendiente (algoritmo de Tobler). Para construir las rutas óptimas se utilizaron los *plug-in r.walk* y *r.path* de GRASS GIS 7.8 a través de R, junto con un análisis de densidad de tipo gaussiano ($\sigma=1500$) para conseguir un raster de densidad de tránsito (véase al respecto CARRERO-PAZOS, 2018). Dado que el objetivo principal de este caso de estudio se centra en demostrar la aplicación de las técnicas estadísticas señaladas anteriormente más que en el estudio en profundidad de esta variable, la modelización de dicho factor se ha simplificado, siendo conscientes de que se omiten particularidades que deberían tenerse en cuenta en trabajos más profundos sobre el tema, como la importancia de la vegetación en el movimiento pedestre.

Modelo 1. «Extents» (Fig. 5A). Se utilizaron los límites territoriales de la totalidad de la Península del Barbanza como elementos sobre los que calcular las rutas óptimas. Un total de 1.000 puntos regulares de inicio y final dispuestos en los límites vectoriales del área de trabajo permitieron generar una red de tránsito de 1 millón de rutas.

Modelo 2. «Grid» (Fig. 5B). Se creó una malla regular de 1.000 puntos dispuestos por la totalidad de la sierra. Cada uno de esos puntos actuó como punto de partida del cálculo del tránsito, y el resto como final. El proceso se repitió para la totalidad de los 1.000 puntos generando, de esta forma, una malla de tránsito.

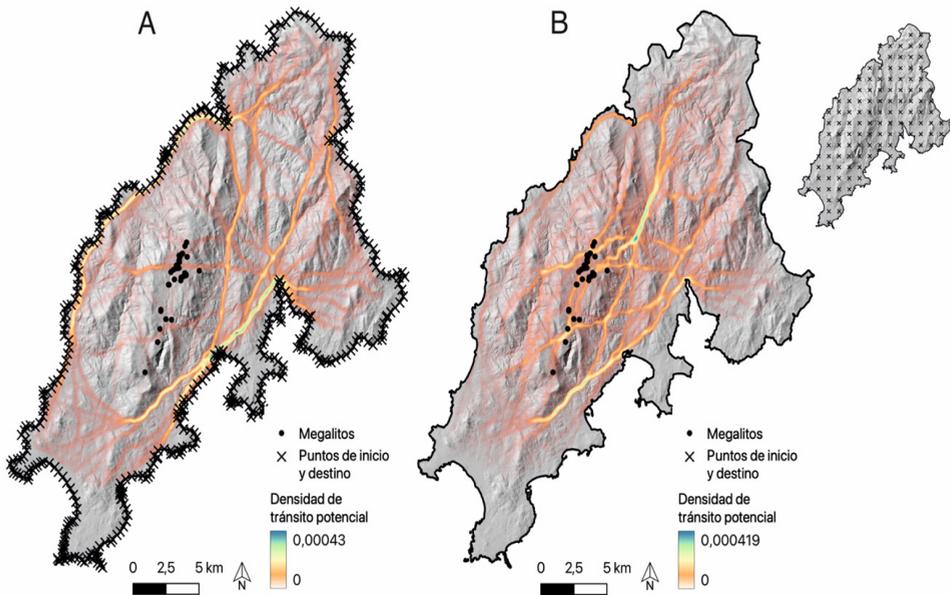


Figura 5. Modelos de tránsito potencial en A Serra do Barbanza creados para este trabajo. A: Modelo «extents» desde los límites geográficos de la península. B: Modelo «grid», definido a partir de una malla de 1.000 puntos regulares en la totalidad de la península (la representación en la figura localizada en la parte superior derecha se ha simplificado con efectos explicativos).

La creación de ambos modelos permite observar interesantes diferencias en torno a cómo el tránsito potencial se articula en este territorio. Del modelo «extents» se concluye un tránsito más tupido por las zonas bajas y a escalas amplias. En efecto, este modelo consigue identificar, por ejemplo, largas rutas de movimiento norte-sur y este-oeste a través de la sierra, aunque aquellas entre medias no se representan de forma tan nítida. En el caso del modelo calculado a partir de un «grid» de puntos regulares, las rutas suelen articularse a todas las escalas, y, sobre todo, destaca la existencia de una gran concentración en torno a las altitudes superiores a los 400 m.s.n.m.; lugar en el cual, de hecho, se encuentra emplazada la concentración de megalitos que estudiamos aquí.

3.2. Creación de modelos de procesos de puntos

Para intentar aportar más base cuantitativa a la asociación entre monumentos tumulares y megalíticos y el tránsito potencial por el paisaje, definimos los siguientes estadios analíticos:

- **Parte 1.** Analizar el patrón monovariante de la covariable específica

(tránsito) y su relevancia con respecto a la distribución de los túmulos, a través de la función *rhohat* de *R Statistics* (BADDELEY *et al.*, 2015).

- **Parte 2.** Crear un modelo estadístico explícito cuyos puntos se generen sobre las zonas de mayor tránsito potencial, y comparar dicho modelo con la distribución de yacimientos arqueológicos. En términos simples, se trata de crear múltiples simulaciones de puntos cuyos eventos sean forzados a localizarse en las zonas de tránsito potencial por el paisaje. La aproximación es similar a una regresión logística, aunque en este caso el análisis será circunscrito sólo a las partes altas de la sierra (>400 m.s.n.m.) para valorar posibles efectos del tamaño del área en los cálculos. El método se concreta en la generación de un modelo de puntos aleatorio (*Poisson* no homogéneo) en el que los eventos aleatorios se situarán sobre las zonas de tránsito. Este análisis puede realizarse en *R Statistics* con la función *rpoispp* del paquete *Spatstat* (BADDELEY *et al.*, 2015).

3.3. Resultados

La función *rhohat* permite observar las relaciones «univariadas» entre una variable dependiente (densidad de túmulos) y la covariable del tránsito potencial (Fig. 6A). Sugiere que la mayor densidad de monumentos está asociada a zonas de tránsito medio, relación confirmada también por una prueba de Berman (valor $p < 2.2e-16$) (Fig. 6B).

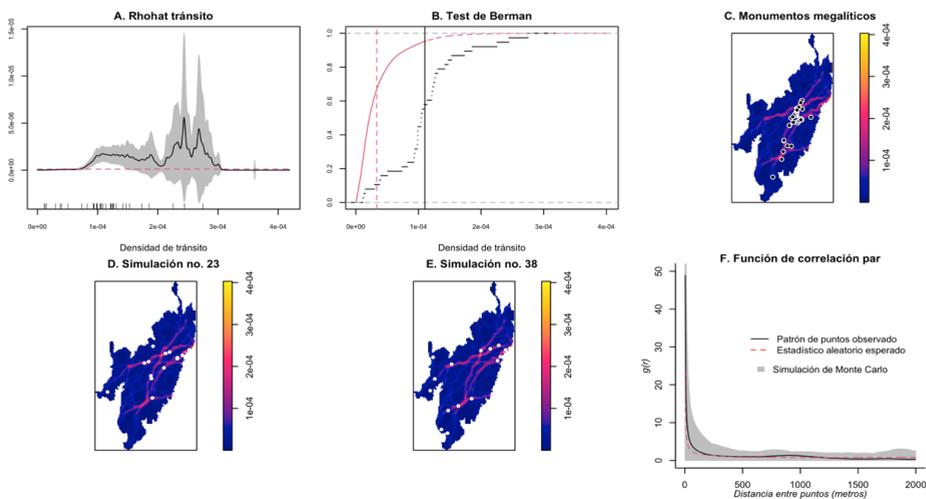


Figura 6. A: Gráfico de la función *rhohat* para la intensidad de monumentos megalíticos en función del tránsito potencial (las líneas negras muestran la estimación de la función, mientras que el sombreado gris un intervalo de simulaciones aleatorias de Monte Carlo al 95% de significación). B: Resultado de la prueba de Berman de bondad de ajuste de un modelo *Poisson*. C: Monumentos megalíticos de *As Chans do Barbanza* sobre el raster de densidad de tránsito potencial. D y E: Dos simulaciones de puntos aleatorios sobre áreas de

concentración de tránsito potencial. F: Función de correlación par con 999 simulaciones de Monte Carlo. Permite comparar las muestras aleatorias localizadas en las zonas de tránsito potencial (intervalo gris al 95% de significación) y la tendencia de los monumentos (línea negra).

En la Fig. 6C observamos la distribución de monumentos en las zonas elevadas del Barbanza (>400m.s.n.m), acompañada de dos simulaciones aleatorias (de las 999 realizadas) que han sido forzadas a establecerse en aquellas áreas de tránsito potencial por la sierra (Fig. 6D y E). Los resultados de la comparación entre las simulaciones aleatorias y los conjuntos tumulares pueden observarse en la función de correlación par (Fig. 6F). Del gráfico se deduce que la línea negra (túmulos megalíticos) se localiza en todas las distancias sobre el intervalo aleatorio gris compuesto por 999 simulaciones de Monte Carlo, generadas sobre las zonas de densidad de tránsito potencial. Esto significa que la estructura y las propiedades de la actual distribución de los monumentos megalíticos son similares a las de los puntos aleatorios condicionados por el tránsito potencial de la sierra. En otras palabras, podemos deducir, con argumentos cuantitativos, que el tránsito potencial es una variable que está aportando valor espacial a los monumentos tumulares y megalíticos de esta zona del Barbanza, pues consigue explicar su distribución y principales propiedades espaciales, y dicha asociación no parece ser producto del azar.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo ha puesto de relieve la importancia de utilizar modelos explícitos de patrones de puntos para profundizar en el conocimiento de las distribuciones de yacimientos arqueológicos y sus relaciones con el paisaje y territorio. El uso de lenguajes de programación como *R Statistics* en Arqueología está suponiendo una renovación importante de los métodos y técnicas de estudio tradicionales, brindando la oportunidad de revisar viejas hipótesis y plantear otras nuevas, tal y como hemos realizado en este artículo.

Por lo que respecta al caso de estudio presentado, los resultados obtenidos indican que el tránsito aporta valor espacial a estas arquitecturas funerarias, sumándose a trabajos anteriores que ya proponían, desde diferentes ópticas, que el movimiento por el paisaje pudo ser uno de los criterios de localización más relevantes del fenómeno tumular y megalítico de A Serra do Barbanza. Si bien es cierto que, tal y como hemos demostrado en trabajos previos (CARRERO-PAZOS *et al.*, 2020), existen otras variables que aportan influencia espacial relevante para entender la actual distribución actual de monumentos, como la proximidad a ejes de cuenca hidrográfica, en esta investigación hemos intentado poner de relieve cómo a través de la formulación de modelos de procesos de puntos podemos visitar criterios de localización ya conocidos. En este sentido, es muy probable que los túmulos megalíticos de *As Chans do Barbanza* pudiesen haber actuado como hitos de demarcación de territorios agropastoriles y articulación del

movimiento por la sierra, pues los patrones que subyacen a la actual distribución de monumentos pueden explicarse gracias al tránsito potencial por este territorio. Probablemente haya que entender dicho tránsito como parte central de la vida de unas sociedades neolíticas semimóviles que utilizaron sus arquitecturas funerarias para marcar zonas agrícolas y ganaderas, es decir, sus paisajes sociales, tal y se ha demostrado en otras áreas peninsulares (RENFREW, 1973, 1976; DÍEZ CASTILLO, 1996: 132; MURRIETA-FLORES, 2012). O quizás haya que entender este argumento a la inversa, y considerar que fue el tránsito por la sierra, recurrente, el motivo que condicionó la localización de las estructuras funerarias consideradas. Resta para posteriores aportaciones entender las implicaciones y significados sociales de esta asociación entre los monumentos y el tránsito, sus diferentes escalas y si dicha relación debe entenderse simplemente desde un punto de vista espacial o más bien como parte de un juego de visibilidades monumentales, tal y como parece evidenciarse en otras necrópolis megalíticas gallegas (cfr. CARRERO-PAZOS, 2018, 2021).

Desde el punto de vista analítico, la formulación de modelos teóricos de simulación computacional resulta de gran interés para la formalización cuantitativa de hipótesis sobre dinámicas de poblamiento de las sociedades pasadas y, con total seguridad, auguramos un futuro prometedor en la investigación arqueológica de nuestro país.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido redactado al amparo del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie número 886793. El autor quiere mostrar su agradecimiento a los evaluadores anónimos por sus comentarios y sugerencias, a los editores de este *dossier*, Salvador Pardo y Alfredo Cortell, por su invitación y ayuda durante el proceso de redacción, y a los profesores Andrew Bevan (*Universidad College de Londres*), Mark Lake (*Universidad College de Londres*) y Enrico R. Crema (*Universidad de Cambridge*) por años de enseñanzas, discusión y trabajo en común en torno a los métodos aquí descritos. Cualquier error es entera responsabilidad del autor.

6. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Este trabajo ha sido realizado cumpliendo los actuales estándares de transparencia y reproducibilidad de la investigación arqueológica mediante el uso de software libre y el lenguaje de programación *R Statistics* (véase, por ejemplo, MARWICK, 2017). Los datos y *scripts* utilizados para reproducir la investigación están disponibles en acceso abierto en el repositorio *Zenodo* (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7476640>), junto a *Github* (https://github.com/MCarreroPazos/Patrones_puntos_Vegueta2023/tree/V.0.3) para trabajo colaborativo.

Los datos se ceden bajo licencia CC-BY4.0 y el código de *R Statistics* bajo licencia MIT. El *script* específico para crear las rutas óptimas fue redactado de

forma colaborativa durante el curso *MOSAICpattern Summer School - Applied Point Pattern Analysis in Archaeology* (Kiel, 20/09/2021-24/09/2021), en vías de publicación en la actualidad (Knitter *et al.*, *In press*). Tanto dicho *script* como el archivo de rutas *raw* generado (gpk) están disponibles bajo petición específica al autor.

7. REFERENCIAS

- AGRAFOXO PÉREZ, X. (1986): *Prehistoria e arqueoloxía da Terra da Barbanza*, Concello, Comisión de Cultura, Noia.
- BADDELEY, A.; RUBAK, E.; TURNER, R. (2015): *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*, CRC Press, London.
- BAILEY, T.C.; GATRELL, A.C. (1995): *Interactive Spatial Data Analysis*, Longman, Harlow.
- BALBO, A. L.; RUBIO-CAMPILLO, X.; RONDELLI, B.; RAMÍREZ, M.; LANCELOTTI, C.; TORRANO, A.; SALPETEUR, M.; LIPOVETZKY, N.; REYES-GARCÍA, V.; MONTAÑOLA, C.; MADELLA, M. (2014): «Agent-based Simulation of Holocene Monsoon Precipitation Patterns and Hunter-gatherer Population Dynamics in Semi-arid Environments», *Journal of Archaeological Method and Theory*, 21: 426-446.
- BARBEITO POSE, V.J.; FÁBREGAS VALCARCE, R.; RODRÍGUEZ RELLÁN, C.; BLANCO CHAO, R.; COSTA-CASAS, M.; MARTÍN SEIJO, M.; PAZ CAMAÑO, A.; FARIÑA COSTA, A.; GORGOSO LÓPEZ, L. (2015): «Ocupacións domésticas na Serra do Barbanza: Resultados preliminares», *Gallaecia*, 34: 125-158.
- BARBEITO POSE, V.J.; FÁBREGAS VALCARCE, R.; RODRÍGUEZ RELLÁN, C.; FARIÑA COSTA, A.; PAZ CAMAÑO, A.; ÁNGELES LÓPEZ TABOADA, M. DE LOS.; SUÁREZ PIÑEIRO, A.M.; ÁBASCAL PALAZÓN, J.M.; FERNÁNDEZ SUÁREZ, G.F.; CASADO GONZÁLEZ, G.; VÁZQUEZ MARTÍNEZ, A.; MARIÑO CALVO, M.V. (2018): «Do planalto ás terras baixas. Novas achegas á ocupación da península do Barbanza dende a Prehistoria ata o Medioevo», *Gallaecia*, 37: 1-38.
- BEN-SAID, M. (2021): «Spatial point-pattern analysis as a powerful tool in identifying pattern-process relationships in plant ecology: an updated review», *Ecological Processes* 10 (56): 1-23.
- BEVAN, A.; CREMA, E.; XIUZHEN, L.; PALMISANO, A. (2013): «Intensities, interactions and uncertainties: some new approaches to archaeological distributions», en A. BEVAN y M. LAKE (eds.), *Computational approaches to archaeological landscapes*, Left Coast Press, Walnut Creek, California: 27-52.
- BEVAN, A. (2020): «Spatial point patterns and processes», en M. GILLINGS, P. HACIGÜZELLER y G. LOCK (eds.), *Archaeological Spatial Analysis. A Methodological Guide*, Abingdon, Routledge: 60-76.
- BUSTELO ABUÍN, J.; RODRÍGUEZ RELLÁN, C.; FÁBREGAS VALCARCE, R.; BARBEITO POSE, V. (2017): «Alén da Serra. O fenómeno tumular na Península do Barbanza a través dos SIX e a estatística espacial», *Gallaecia*, 36: 53-72.
- CARRERO-PAZOS, M. (2018): «Modelando dinámicas de movilidad y visibilidad en los paisajes megalíticos gallegos. El caso del Monte de Santa Mariña y su entorno (Comarca de Sarria, Lugo)», *Trabajos de Prehistoria*, 75 (2): 287-306.
- CARRERO-PAZOS, M., BEVAN, A., LAKE, M. (2019): «The spatial structure of Galician megalithic landscapes (NW Iberia): A case study from the Monte Penide

- region», *Journal of Archaeological Science*, 108, 104968.
- CARRERO-PAZOS, M.; BUSTELO ABUÍN, J.; BARBEITO POSE, V.; RODRÍGUEZ RELLÁN, C. (2020): «Locational preferences and spatial arrangement in the barrow landscape of Serra do Barbanza», *Journal of Archaeological Science Reports*, 31: 102351.
- CARRERO-PAZOS, M. (2021): «La visibilidad como factor de localización en los megalitos del sur de Galicia», *Zephyrus*, 87: 63-81.
- CHISHOLM, M. (1962): *Rural settlement and land use*, Routledge, London.
- CONOLLY, J.; LAKE, M. (2009): *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Arqueología*, Bellaterra, Barcelona.
- CREMA, E.R. (2020): «Time and Probabilistic Reasoning in Settlement Analysis», en J. A. BARCELO E I. BOGDANOVIC (eds.), *Mathematics and Archaeology*, CRC Press, Boca Raton: 314-334.
- CRiado BOADO, F.; AIRA RODRÍGUEZ, M.J.-; DÍAZ-FIERROS VIQUEIRA, F. (1986): *La construcción del paisaje: megalitismo y ecología. Sierra de Barbanza*, Dirección Xeral do Patrimonio Artístico e Monumental, Santiago de Compostela.
- CRiado BOADO, F. (1988): «Mámoas y rozas: panorámica general sobre la distribución de los túmulos megalíticos gallegos», *Trabajos de Antropología e Etnología*, 18: 151-160.
- CRiado-BOADO, F.; VUELTA-SANTÍN, R. (2017): *Rocking Barbanza. Una representación performativa de la organización espacial del paisaje megalítico en la Sierra de Barbanza (Galicia, España)*. <http://hdl.handle.net/10261/154985>
- CRiado BOADO, F.; VILLOCH VÁZQUEZ, V. (2000): «Monumentalizing landscape: from present perception to the past meaning of Galician Megalithism (north-west Iberian Peninsula)», *European Journal of Archaeology*, 3: 188-216.
- DACEY, M. F. (1973): «Statistical Tests of Spatial Association in the Locations of Tool Types», *American Antiquity* 38 (3): 320-328.
- DALE, M. (1999): *Spatial Pattern Analysis in Plan Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- DIEZ CASTILLO, A. (1996): «Utilización de los recursos en la marina y montaña cantábricas: una prehistoria ecológica de los valles del Deva y Nansa», *Illunzar*, 3: 11-185.
- DIGGLE, P. J. (1983): *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*, Academic Press, New York.
- DIGGLE, P. J. (2014): *Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns*, CRC Press, Boca Raton.
- EPSTEIN, J.M. (2008): «Why Model?», *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4): <https://www.jasss.org/11/4/12.html>.
- EVE, S.; CREMA, E.R. (2014): «A House with a View? Multi-model Inference, Visibility Fields, and Point Process Analysis of a Bronze Age Settlement on Leskernick Hill (Cornwall, UK)», *Journal of Archaeological Science*, 43: 267-277.
- FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNDSON, C. y CHARLTON, M. (2000): *Quantitative Geography*, SAGE Publications, London.
- HAGGETT, P. (1976): *Locational Analysis in Human Geography*, Edward Arnold: London.
- ILLIAN, J.; PENTTINEN, A.; STOYAN, H.; STOYAN, D. (2008): *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*, John Wiley and Sons, Chichester.
- JORGE, V.O. (1991): «Necrópole pré-histórica da Aboboreira (Distrito do Porto). Uma hipótese de diacronía, en M.C. RODRIGUES LOPES (ed.), *Homenagem a J. R. dos Santos Júnior*, Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa: 205-

213.

- KNITTER, D.; GÜNTHER, G.; KEMPF, M.; BILOTTI, G.; CARRERO-PAZOS, M.; LIU, C; OKSANEN, E; (e. p.): «Point pattern analyses as a tool for identifying relevant drivers of societal transformation processes based on diachronic exploration of absolute and relative site parameter», *PLoS One*.
- KRISTIANSEN, K. (2015): «The decline of the Neolithic and the rise of Bronze Age Society», en C. FOWLER, J. HARDING y D. HOFMANN (eds.), *The Oxford Handbook of Neolithic Europe*, Oxford University Press, Oxford: 1-19.
- KVAMME, K. L. (2020): «Analysing regional environmental relationships», en M. GILLINGS, P. HACIGÜZELLER y G. LOCK (eds.), *Archaeological Spatial Analysis. A Methodological Guide*, Routledge, Abingdon: 212-230.
- LAKE, M. (2014): «Trends in Archaeological Simulation», *Journal of Archaeological Method and Theory*, 21: 258-287.
- LAWTON, J. H. (1999): «Are there general laws in ecology?», *Oikos*, 84: 177-192.
- LLOBERA, M. (2015): «Working the Digital: Some thoughts from Landscape Archaeology», en R. CHAPMAN y A. WYLIE (eds.), *Material Evidence: Learning from Archaeological Practice*, Routledge, Abingdon: 173-188.
- MARTINÓN-TORRES, M. (2001): *Os monumentos megalíticos despois do Megalitismo. Arqueoloxía e Historia dos megalitos a través das fontes escritas (s. VI – s. XIX)*, Concello de Valga, Valga.
- MARWICK, B. (2017). «Computational Reproducibility in Archaeological Research: Basic Principles and a Case Study of Their Implementation», *Journal of Archaeological Method and Theory*, 4: 424-450
- MURRIETA-FLORES, P. (2012). «Understanding human movement through spatial technologies: the role of natural areas of transit in the Late Prehistory of South-western Iberia», *Trabajos de Prehistoria* 69 (1), 103-122.
- NAKONINZ, O.; KNITTER, D. (2016): *Modelling Human Behaviour in Landscapes*, Springer, Switzerland.
- NÜSSLIN, A., NUNINGER, L.; VERHAGEN, P. (2020): «To Boldly Go Where No One Has Gone Before: Integrating Site Location Analysis and Predictive Modelling, the Hierarchical Types Map», en J.B. GLOVER, J. MOSS y D. RISSOLO (eds.), *Digital Archaeologies, Material Worlds (Past and Present). Proceedings of the 45th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Tübingen University Press, Tübingen: 15-31.
- O'SULLIVAN, D.; PERRY, G.L.W. (2013): *Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process*. John Wiley & Sons, Chichester.
- O'SULLIVAN, D.; UNWIN, D.J. (2003): *Geographic Information Analysis*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- PARCERO OUBIÑA, C.; FÁBREGA ÁLVAREZ, P. (2006): «Diseño metodológico para el análisis locacional de asentamientos a través de un SIG de base raster», en I. GRAU MIRA (ed.), *La aplicación de los SIG en la Arqueología del Paisaje*, Servicio de Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante: 69-91.
- RENFREW, C. (1973): *The explanation of culture change: models in prehistory*, Duckworth, Liverpool.
- RENFREW, C. (1976): «Megaliths, territories and populations», en S.L. DE LAET (ed.), *Acculturation and Continuity in Atlantic Europe, mainly during the Neolithic period and the Bronze Age. Papers Presented at the IV Atlantic Colloquium*, Ghent, De Tempel, Bruges: 198-220.
- RIPLEY, B.D. (1981): *Spatial Statistics*, John Wiley and Sons, New York.

- RODRÍGUEZ CASAL, A.A. (2010): «El fenómeno tumular y megalítico en Galicia: caracterización general, problemas y perspectivas», en J. FERNÁNDEZ ERASO y J.A. MUJICA ALUSTIZA (eds.), *Actas del Congreso Internacional sobre Megalitismo y otras manifestaciones funerarias contemporáneas en su contexto social, económico y cultural* (Munibe, 32), Aranzadi, Donostia: 58-93.
- RODRÍGUEZ RELLÁN, C.; FÁBREGAS VALCARCE, R. (2015): «Arte rupestre galaica: unha achega dende a estatística espacial e os SIX», *SÉMATA, Ciencias Sociais e Humanidades*, 27: 323-348.
- RODRÍGUEZ RELLÁN, C.; FÁBREGAS VALCARCE, R. (2019): «Monuments on the move. Assessing megaliths' interaction with the North-Western Iberian landscapes», en M. HINZ, J. MÜLLER y M. WUNDERLICH (eds.), *Megaliths, Societies and Landscapes: Early Monumentality and Social Differentiation in Neolithic Europe*, Habelt, Bonn: 621-639.
- RUBIO-CAMPILLO, X. (2017): «El papel de la simulación en la arqueología actual», en D. JIMÉNEZ-BADILLO (ed.), *Arqueología computacional. Nuevos enfoques para la documentación, análisis y difusión del patrimonio cultural*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México: 51-58.
- RUBIO-CAMPILLO, X.; CELA, J.M.; HERNÁNDEZ CARDONA, F.X. (2012): «“Simulating” Archaeologists? Using Agent-based Modelling to Improve Battlefield Excavations», *Journal of Archaeological Science*, 39: 347-356.
- SHENNAN, S.; DOWNEY, S.S.; TIMPSON, A.; EDINBOROUGH, K.; COLLEDGE, S.; KERIG, T.; MANNING, K.; THOMAS, M.G. (2013): «Regional Population Collapse Followed Initial Agriculture Booms in Mid-Holocene Europe», *Nature Communications*, 4: 2486.
- VERHAGEN, P.; WHITLEY, T. (2011): «Integrating Archaeological Theory and Predictive Modeling: a Live Report from the Scene», *Journal of Archaeological Method and Theory*, 19: 1-52.
- VERHAGEN, P.; WHITLEY, T. (2020): «Predictive spatial modelling», en M. GILLINGS, P. HACIGÜZELLER y G. LOCK (eds.), *Archaeological Spatial Analysis. A Methodological Guide*, Routledge, Abingdon: 231-246.
- WARREN, R. E. (1990): «Predictive modeling in Archaeology: A primer», en K.M.S. ALLEN, S.W. GREEN y E.B.W. ZUBROW (eds.), *Interpreting space: GIS and archaeology*, Taylor & Francis, London: 90-111.
- WARREN, R.E.; ASCH, D.L. (2000): «Site location in the Eastern Prairie Peninsula», en K. L. WESCOTT y R. J. BRANDON (eds.), *Practical applications of GIS for archaeologists: A predictive modelling toolkit*, Taylor & Francis, London: 5-32.
- WHALLON, R. 1974. «Spatial analysis of occupation floors. I. Applications of dimensional analysis of variance», *American Antiquity*, 38: 320-328.
- WIEGAND, T.; HUTH, A.; MARTÍNEZ, I. (2009): «Recruitment in tropical tree species: revealing complex spatial patterns», *The American Naturalist*, 174: E106-E140.
- WIEGAND, T.; MOLONEY, K.A. (2014): *Handbook of Spatial Point-Pattern Analysis in Ecology*, CRC Press, Boca Raton.