

Aplicación SIG y modelos históricos

Prácticas y perspectivas de análisis de movilidad



Pedro Trapero Fernández

Universidad de Cádiz, España

pedro.trapero@uca.es

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5808-054X>

Resumen

El uso de SIG para la historia y arqueología es una práctica cada vez más común gracias a mayor accesibilidad y facilidad de las herramientas y a un proceso metodológico más sólido. Sin embargo, cuando vemos su uso en artículos científicos no siempre se está sacando todo el partido o incluso se incurre en malas prácticas. Un método SIG aplicado debe servir para analizar y proporcionar nuevos datos a un modelo histórico, o una serie de preguntas a responder a través de un método teórico. En este artículo discutimos estas cuestiones con el ejemplo de los análisis de movilidad, uno de los más utilizados, que en su versión simple calcula tiempos y caminos óptimos de comunicación, pero que, si se desarrolla, permite una gama de datos de gran utilidad para responder cuestiones históricas.

Palabras Clave:

Sistemas de Información Geográfica; Modelos teóricos; Modelos históricos; Movilidad; Análisis de Costes

Resumo

A utilização de SIG para a história e arqueologia é uma prática cada vez mais comum devido a uma maior acessibilidade e facilidade de utilização das ferramentas e a um processo metodológico avançado. No entanto, quando vemos a sua utilização em artigos científicos, nem sempre está a ser plenamente explorada, ou mesmo a cair em má prática. Um método SIG aplicado deve servir para analisar e disponibilizar novos dados a um modelo histórico, um conjunto de perguntas a esclarecer por meio de um método teórico. Neste artigo discutimos estas questões com o exemplo da análise da mobilidade, uma das mais utilizadas, que na sua versão simples calcula tempos e caminhos de comunicação óptimos, mas que, se desenvolvida, permite uma série de dados de utilidade para responder a questões históricas.

Palavras-chave:

Sistemas de Informação Geográfica; Modelos Teóricos; Modelos Históricos; Mobilidade; Análise de Custos

1. Introducción

En este artículo se discute la aplicación de los SIG a la Historia y la Arqueología realizando a la vez una lectura crítica. Se exponen sus potencialidades y posibles problemas haciendo hincapié en la necesidad de adaptar las modelizaciones SIG a preguntas históricas y no al revés. Se muestran también varios ejemplos ilustrativos provenientes de la propia experiencia personal del autor en análisis de movilidad terrestre, fluvial y marítima.





Los Sistemas de Información Geográfica (en adelante SIG), son bases de datos georreferenciadas que nos permiten localizar y analizar en el espacio una serie de entidades. Para Humanidades y específicamente en Historia y Arqueología, son unas herramientas cada vez más importantes para crear inventarios, catalogaciones, diseñar trabajos de campo, generar modelos, etc. Siguiendo las líneas del número monográfico, en este artículo se discute la aplicación de (SIG) a Historia y Arqueología mientras se hace una revisión crítica a los usos más frecuentes. El auge de su aplicación en este campo en los últimos años junto con la adaptación de metodologías de otras ciencias a la nuestra, hace que muchas veces se incurra en mala praxis.

Defendemos en este artículo que este tipo de análisis tiene que estar dirigido desde la pregunta histórica, ya que, si no es así, podemos caer en la utilización de los SIG como fin y no como medio. Por supuesto existen distintos niveles de uso, desde simplemente representar los datos espacialmente en una cartografía, hasta realizar un modelo empírico que nos de datos estadísticos y por tanto criterio para comprobar nuestras hipótesis. Sin duda, se trata de un cambio de paradigma respecto a la historiografía tradicional, que como en otras disciplinas que involucran técnicas informáticas genera cierta brecha digital. Aunque las herramientas son accesibles a la mayoría, la elevada curva de aprendizaje hace que sea difícil poder utilizarlas por todos, y cuando ocurre, a veces su uso induce a la mala praxis. Es por ello que veremos las potencialidades y posibles problemas de su aplicación, especificando brevemente la metodología para una de las aplicaciones más utilizadas, la de la movilidad. Este tipo de análisis permite estudiar de forma teórica el movimiento en el espacio actual, requiriendo una serie de adaptaciones para aplicarlo a época histórica, por los posibles cambios del terreno, condicionantes, vehículos, mentalidad, etc. Creemos que es un buen ejemplo para ilustrar estas problemáticas de los SIG, viendo la movilidad terrestre pero también fluvial y marítima, a partir de bibliografía y experiencias del autor.

2. Uso de SIG en Historia y Arqueología

Cuando un alumno de Humanidades en general y de Historia y Arqueología en particular se encuentra por primera vez con los SIG, a veces le parecen algo extraño, propia de las ciencias puras, no suele ver su potencialidad y muchas veces acaba por pasar de largo. En algunos casos, así es, sobre todo cuando el alumno acaba trabajando en algo que no tiene relación directa con la geografía. Sin embargo, todo proceso histórico que involucre procesos que se dan en el espacio puede ser representado y analizado a través de un SIG.

Es algo lógico si consideramos la profunda relación que tienen la Geografía con la Historia, ramas paralelas con muchísimos puntos en común. Actualmente, además tenemos un móvil en la mano, que nos da la posición, nos ayuda a llegar a los sitios y nos guarda la información espacial, queramos o no. Nuestro móvil, entre otras funciones, es un gran SIG, que utilizamos inconscientemente. Para el caso de la Historia y prácticamente en todos los ámbitos de la Arqueología, los SIG son plataformas de trabajo que dan fundamentalmente cuatro grandes funciones, a saber:

La primera y más básica, es la capacidad que tenemos de hacer una base de datos georreferenciada, incluir nuestros sitios en el espacio y dotarlos de información según unos campos definidos previamente. Esto es lo normal en el caso de inventarios de patrimonio o para un



catálogo de investigación. Esta aplicación está muy extendida, como en las administraciones públicas y es muy sencilla de aprender para cualquier usuario.

Un segundo nivel de aplicación, sería cuando no solamente queremos generar un catálogo, sino que buscamos incorporar nuevos datos espaciales y utilizar el SIG como una herramienta donde comparar y analizar información. El caso más claro es mediante la georreferenciación de cartografía histórica. Este tipo de dato es una fuente de información que en muchas investigaciones hay que realizar, pero que aumenta en valor cuando se sitúa en el espacio permitiendo su comparación. Cualquier información que analicemos, por ejemplo, cartografía del medio natural, parcelarios actuales, Modelos Digitales del Terreno..., es un añadido a nuestros datos. Se trata de un medio donde podemos relacionar distintas fuentes de datos visualmente mediante la superposición de capas. Esta aproximación también es sencilla, siendo las herramientas de georreferenciación accesibles, aunque requiere de práctica.

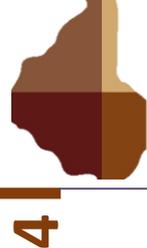
En tercer lugar, tenemos el fin que se suele buscar en los SIG y es la representación cartográfica en figuras. Todos queremos generar unos mapas y planos atractivos y explicativos de nuestros métodos y resultados. Los SIG suelen tener diseñadores de impresión específicos que facilitan mucho esta labor.

Finalmente, una cuarta aplicación es el análisis y la creación de modelos. Para ello los SIG vienen acompañados de unas herramientas más o menos complejas. Aquí es donde reside el foco de este artículo, en cuanto nos permite generar nuevo conocimiento, siendo la curva de aprendizaje mucho más larga y compleja.

3. Modelo Histórico

Un modelo, como nosotros lo entendemos, es una representación de una realidad, una aproximación teórica a un proceso, en este caso histórico, que queremos conocer y para el que estas herramientas nos ayudan a analizar hipótesis mediante datos empíricos. El ejemplo actual más claro sería el de la simulación, como puede ser el de vuelo, que no es un avión real, pero refleja los componentes principales del proceso pilotar. Todas las ciencias necesitan de generar modelos empíricos para predecir las respuestas que ocurrirán en la práctica, por ejemplo, un estudio meteorológico que nos diga cómo será el tiempo mañana. No quiere decir que la fiabilidad del mismo sea 100% (siguiendo el ejemplo, la predicción del clima a veces se equivoca), pero sí que sea significativamente veraz. Generalmente un modelo es consistente cuando su umbral de incertidumbre es muy bajo y se ha contrastado con suficientes datos para que sea robusto.

Ahora bien, en el caso de la Historia nuestros modelos son muy complejos, ya que no podemos comprobar de forma empírica, mediante práctica los procesos pasados (Grau, 2006). El umbral de incertidumbre hace que para las Humanidades en general estos modelos sean menos “seguros”, de ahí en parte la aparente debilidad que tiene como ciencia. Sin embargo, que no se pueda tener una máquina del tiempo que nos permita comprobar la veracidad de las afirmaciones, no significa que no se puedan plantear modelos que respondan a las preguntas (Brughmans, 2013). Lo mismo ocurre con otras ciencias como la tectónica o la astrofísica, donde no podemos analizar directamente una placa o un agujero negro.



Por tanto, un modelo histórico es una aproximación teórica que hacemos del pasado, intentando comprender los condicionantes y definiendo como se comportaría la sociedad, que al fin y al cabo es el foco final de cualquier investigación. A veces se confunde un modelo SIG con uno histórico, ya que se usa el término indistintamente para los dos casos, produciendo equívocos. Un modelo SIG es una aplicación analítica que hacemos de unos datos. Por ejemplo, modelamos las comunicaciones entre dos ciudades, viendo cual sería el camino más corto. Este primer caso genera una fuente nueva de información, el propio camino.

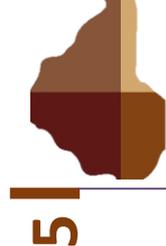
Un modelo, tal y como lo hemos definido antes, conjuga los elementos que tenemos (fuentes, bibliografía), con una pregunta histórica (objetivo), para llegar a una aproximación lo más acertada posible de la realidad. Siendo esto así, la información literaria de la existencia de una vía de comunicación por ese sitio y un análisis SIG de camino óptimo, son informaciones que añadimos como nuevos datos. Por supuesto, el nivel de fiabilidad de la primera fuente será superior a la segunda.

Por todo ello es muy importante no perder de vista una cuestión fundamental, ¿Cuáles son nuestras preguntas históricas?, este es el eje sobre el que gira el análisis. Las hipótesis, objetivos y metodologías estarán en línea con eso. Lo ideal siempre es una respuesta tajante, pero lo más normal es que lleguemos a varias posibilidades, ¿Cómo podemos elegir la mejor?, generando diversos modelos históricos y analizando cuál de ellos es el más probable para adaptarse a la realidad en base a las fuentes de información disponibles.

4. Malas prácticas y competencias

Entrando en materia, los SIG permiten generar información para modelos históricos espaciales de múltiples maneras. Se caracterizan por utilizar múltiples herramientas SIG en combinación, lideradas por la pregunta histórica que queremos resolver. En general, las formas más comunes son el estudio del paisaje, territorio y economía. Para ello se recurren a estudios como son la de movilidad, que desarrollaremos más adelante, densidad de yacimientos, análisis de la visibilidad, estudios de límites territoriales, análisis locacional, estudio de redes viarias o incluso aplicaciones a reconstruir a la topografía y condicionantes antiguos como son las redes hidrográficas y paisajes cambiantes, caso de la costa ríos (Grau, 2006; Mínguez *et al.* 2016).

- Generalmente vemos estas representaciones en artículos académicos en las figuras, donde se suelen reconstruir las condiciones y elementos del momento en cuestión. Hay que hacer notar que las posibilidades son tantas como preguntas históricas que involucren el espacio planteemos, si bien algunas tienen más tradición y son más sencillas de usar. Esta mayor facilidad, a veces es un problema, ya que conlleva ejemplos de mala praxis, como son los casos siguientes:
- Generalmente se busca cierto sensacionalismo, por lo que las figuras son especialmente llamativas, aunque no aporten información o para llegar a ellas tengan una metodología cuestionable.
- Suelen incurrir en un método muy complejo, con muchas referencias y bibliografía que lo soporte, pero pobremente documentado en su ejecución.



- A veces se utiliza información que no está correctamente referenciada o contrastada. Esto suele ocurrir cuando se utilizan datos de terceros, donde la información puede o no ser fidedigna, pero se utiliza como tal.
- Y, sobre todo, se utiliza la técnica novedosa y compleja para confundir al lector, que no suele conocer sus detalles, dando por demostrada una hipótesis mediante estos cálculos, cuando el lector general no tiene las herramientas para comprobarlo. En estos casos, se vende una aproximación, pero, o existen otras posibilidades viables que se ignoran, o se descartan dichas opciones dada la magnitud de los datos aportados.

Este último caso es el más peligroso a la hora de tener criterio y seleccionar los modelos planteados. Un modelo SIG es una aproximación empírica a una realidad, por lo que podría ser visto por unos autores más puristas como algo criticable o revisable. Lo que ocurre es que a veces, el método que se utiliza es tan complejo, con muchos elementos y cálculos, que un pequeño error (intencionado o no) puede modificar por completo todo el proceso. Por supuesto hay que hacer concesiones dentro de nuestras aproximaciones, al fin y al cabo, son teoría, pero debemos ser conscientes de ellas y expresarlas claramente para el lector, no esconderlas y justificar nuestro trabajo. Sobre estas cuestiones, hay una última problemática y es la competencia para hacer modelos históricos con SIG. Dado que la curva de aprendizaje es muy alta, ocurre que a veces, es más sencillo pedir a un especialista en SIG que realice el análisis en cuestión y sea el historiador el que interprete los datos. No se nos ocurre realizar por nuestra cuenta una datación de carbono catorce, sino que la mandamos hacer a un especialista, que tiene las competencias adecuadas. Sin embargo, creemos que el historiador o arqueólogo que utiliza un SIG para analizar espacialmente sus datos, requiere de al menos una formación previa, bien por comprender las limitaciones del cálculo efectuado, o por saber leer correctamente los datos. Ejemplos de buenas prácticas los podemos encontrar en obras recopilatorias como las coordinadas por Mayoral *et al.* (2017) o Sarris (2015).

Creemos que es necesario que sean los propios historiadores quienes se aventuren a realizar los modelos SIG, ya que así es como se puede desarrollar este tipo de aproximaciones. Desde las Humanidades hemos ido incorporando una serie de herramientas y métodos de otras ciencias, pero haciéndolas nuestras. Todavía falta un largo camino por recorrer, ya que las herramientas que usamos están desarrolladas para otros propósitos. Eso hace que la aplicación se circunscriba a lo que ya existe, adaptando de forma a veces forzada los argumentos, ya que no contamos con datos reales del territorio y paisaje, ni herramientas adaptadas a las capacidades y tecnologías pasadas.

Para ilustrar las cuestiones descritas, desarrollaremos los análisis de la movilidad, donde podemos aportar ejemplos propios y describiendo sus partes. Partimos de la teoría, para ver las prácticas más habituales, cual es el estado actual de su uso y potencialidades futuras.

5. Modelos de movilidad

5.1 Teoría de la movilidad

La movilidad es el desplazamiento de seres vivos y objetos por el espacio. Uno de los análisis más interesantes que podemos hacer con SIG es precisamente el cálculo de rutas óptimas



que conecten dos espacios. ¿Cuánto tiempo tardaríamos de ir desde mi casa hasta el supermercado más próximo? un sencillo caso de estudio que actualmente calculamos con Google Maps. Si queremos hacer este ejemplo en un momento pasado, necesitamos conocer una serie de condicionantes espaciales, tecnológicos y unas herramientas que nos permitan comprenderlos.

En general, los modelos de movilidad son una práctica común con muchas aproximaciones recientes (Verbrugge *et al.* 2017; Alberti, 2018; Carreras *et al.* 2019; Milheira *et al.* 2019; Verhagen *et al.* 2019). La mayor parte de las aproximaciones que se analizan, utilizan dos herramientas complementarias, como es el cálculo de coste de ruta y la generación de caminos óptimos. Esto es lo mismo que hacemos con un móvil o el GPS de un coche para determinar una ruta. Los condicionantes espaciales pueden ser muy variados, dependiendo del tipo de vehículo que consideremos. Por tanto, lo primero que debemos definir es ¿qué es lo que se mueve?, ¿cómo lo hace? y después ¿por dónde se mueve?, así como los obstáculos o limitaciones al movimiento que podían existir en el pasado, para a continuación ver las capacidades reales que tenemos de modelizar con SIG estas posibilidades

5.2 Vehículos

El principal ejemplo de movilidad es el de las personas. Un ser humano tiene una serie de limitaciones básicas que podemos modelizar en un SIG. La capacidad de andar o correr está limitada a una serie de condiciones, pero de media un adulto puede caminar a un paso tranquilo recorriendo unos cinco kilómetros por hora (km/h). Para un cálculo de este tipo no solemos considerar la opción de correr, ya que salvo casos excepcionales no permite lograr largas distancias. También se suele analizar como un movimiento continuo, es decir que no hay paradas ni descansos para dormir (Collischonn e Pilar, 2000).

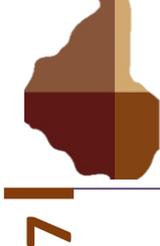
Para un modelo histórico, un ser humano hoy y en el pasado tiene los mismos condicionantes, pero no ocurre así con otros vehículos. Actualmente estamos acostumbrados a desplazarnos a 120 km/h en coche o trasladarnos en avión a más de 800 km/h. Sabemos que para épocas pasadas los motores de la movilidad solían ser los animales de transporte, como los caballos, burros, mulos y bueyes o con sus combinaciones en carros y carromatos (Haisman e Goldman, 1974; Herzog, 2014; Fonte *et al.* 2017; Carreras *et al.* 2019). También modificará mucho esta movilidad el volumen y peso de la carga a transportar (Burford, 1960).

Pero este no es el único vehículo que debemos considerar, ya que el medio acuático era muy importante, siendo de hecho preferido en muchos casos por su bajo coste y mayor capacidad de carga, aunque pudiera resultar más lento. La velocidad, carga y lugar por donde puede navegar, hace que tengamos distintos vehículos. Por ello podemos dividir los condicionantes en dos grandes grupos, terrestre y acuático.

5.3 Condicionantes de movilidad terrestre

Sea una persona, animal o carro el que queremos estudiar cómo se desplaza, tenemos que conocer el lugar de origen y si es posible el de destino, tipo de movimiento y que dificultades tiene por el camino. Por ejemplo, en nuestro modelo es muy distinto calcular la movilidad de una persona sola, a un ejército, que un carromato cargado con varias toneladas de peso. En tierra, el condicionante general es el propio relieve del terreno, ya que es más fácil transitar en





una zona llana, que en un monte. La diferencia de pendiente, es lo que favorece o dificulta el paso, algo que fácilmente podemos calcular con un Modelo Digital de Elevaciones. Por ejemplo, en el caso de una persona por un terreno plano iríamos fácilmente a un paso ligero, mientras que, si es escarpado, veríamos sustancialmente limitada la velocidad. A ello habría que añadir otros condicionantes, por ejemplo, zonas donde es difícil caminar, en suelos con agua como un pantano o con una excesiva vegetación.

Para un análisis actual tenemos este tipo de condicionantes accesibles como datos espaciales en un SIG. Sin embargo, para una época pasada, tenemos que partir de estimar cuales serían. De forma general tanto un animal como persona se desplaza mejor en un llano con una pequeña pendiente, mientras que tarda más tiempo y energía en hacerlo cuando va cuesta abajo y arriba. La diferencia es que un tipo u otro de vehículo utiliza más o menos tiempo y puede transitar durante un periodo diferente. Por ejemplo, una persona o animal podría andar muchas horas seguidas al día, ahí tenemos las peregrinaciones, como el camino de Santiago. Sin embargo, lo normal es que esté limitado a un tiempo al día, coincidiendo con las horas de luz, que cambian según las estaciones.

La topografía del terreno, para época histórica, no ha sufrido grandes transformaciones. Ciertamente depende del nivel de escala que utilicemos. El cambio histórico ocasionado en una escala grande, por ejemplo, un estudio micro en una villa cercana a la costa, la veracidad de estos datos y su resolución serán más cuestionables. Por el contrario, en una escala pequeña donde vemos la movilidad entre ciudades separadas cientos de kilómetros los cambios en el territorio y paisaje serán mucho más fáciles de determinar y el error posiblemente despreciable. Se han desarrollado diversas aplicaciones sobre el tema como ORBIS de acceso libre online donde podemos ver la combinación de estos condicionantes a pequeña escala como es el Mediterráneo (Scheidel e Meeks, 2022).

De todos los posibles condicionantes que podemos pensar, uno es especialmente importante en este tipo de aproximaciones y son las masas de agua. Los ríos, arroyos y lagos han cambiado mucho a lo largo del periodo histórico, no tanto en su propia cuenca, sino en su tamaño y posición. Sin embargo, la problemática está en que son espacios difíciles de transitar, a menos que se hayan construido infraestructuras, como puentes. Estos condicionantes antrópicos tienen que ser conocidos. Además, veremos más adelante que suponen un problema por la propia forma en que los algoritmos calculan el desplazamiento.

5.4 Condicionantes de movilidad acuática

Para el caso de la movilidad en medio acuático los principales condicionantes están determinados por el tipo de barco. El medio que se utiliza puede ser muy distinto, según si consideramos una navegación fluvial o marítima. En el primer caso, mientras que el barco tenga un calado suficiente, su desplazamiento está limitado por la fuerza de la corriente del río y por los esfuerzos del propio vehículo para moverse. Aquí podemos encontrarnos con remos, velaje o incluso apoyos desde tierra con sogas. Lo interesante en este tipo de movilidad es que depende de la orientación respecto al río, siendo más fácil ir a favor de la corriente que en contra.

En el caso de la navegación marítima, nos encontramos con un escenario muy complejo, dado que el vehículo está condicionado por corrientes, oleaje, mareas y vientos. Aquí no suele



ser tan importante el calado, salvo cuando consideremos acercarnos a la costa, donde podemos tener la batimetría como un parámetro básico que permite o no el paso. Al revés que, en caso terrestre, un barco se mueve por sí solo, si se deja sin control, teniendo que actuar en muchos casos con fuerzas contrarias a la dirección deseada. Por ello determinar los condicionantes de movilidad para el medio acuático, es sustancialmente más complejo que en análisis terrestre.

5.5 Mapas de fricción

Para desplazar cualquier objeto intervienen unas fuerzas a favor de la dirección de movimiento y otras en contra. Dado que el modelo va a estimar las que están a favor, tenemos que disponer de las otras. Por ello generamos mapas de fricción, que son capas ráster, como los píxeles de una imagen, donde decimos la dificultad que tiene moverse dependiendo de un algoritmo que nos convierta estos valores en números que podamos entender, generalmente tiempo o energía (Herzog 2010). En el caso del medio terrestre puede ser la pendiente. Crear un mapa de fricción coherente con la pregunta histórica a determinar es básico para generar un modelo correcto. Para ello tenemos que hacer el cálculo utilizando un algoritmo de fricción que convierta este coste teórico, en términos que podamos entender, generalmente en tiempo o energía (Tobler, 1993; Llobera e Sluckin, 2007; Baek e Choi, 2017).

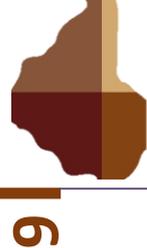
Actualmente, es posible establecer un mapa de fricción utilizando las pendientes del terreno, más una serie de limitadores de la movilidad, caso de atravesar un área boscosa. Igualmente es posible crear lugares de preferencia de tránsito, como al disponer de una red de caminos ya establecidos. Estos dos criterios son muy complejos de aplicar para épocas históricas, especialmente cuanto más atrás en el tiempo nos vayamos. No sabemos muchas veces como ha cambiado el paisaje y si esa zona boscosa era igual de intransitable en el pasado, lo mismo que la red de caminos que tenemos actualmente. Es por ello que debemos conocer muy bien el territorio que queremos trabajar para poder crear condicionantes que se ajusten a la realidad.

6. Prácticas comunes

Para crear un mapa de fricción generalmente se parte de las pendientes del terreno. En nuestros ejemplos utilizaremos el software ArcGIS, si bien otros como Qgis tiene aplicaciones similares de análisis, como son las de r.cost o r.walk. Dentro de la caja de herramientas Spatial Analysis tenemos Slope, que convierte un Modelo Digital del Terreno (MDT) por cada valor del ráster en la pendiente que puede ser expresada en grados o porcentajes.

Con herramientas como Coste de Distancia de ArcGIS, podemos calcular desde un punto, línea o polígono del espacio el coste que tendría desplazarse a las celdas contiguas y hasta la última del ráster. Este cálculo se hace en base a la fricción que damos y es consecuente con la dirección (es más fácil bajar una suave pendiente que subirla), para el caso del método de isotrópico para calcular rutas óptimas. Existe otra opción denominada anisotrópico que tiene en cuenta la ida y vuelta por lo que considera tanto subida como bajada (Herzog, 2014; White, 2015). La aplicación principal de esto es otro ráster que nos muestra visualmente las zonas más accesibles y las que no.

Otra aplicación derivada de esta es crear en el proceso también un ráster de Vínculo Anterior y utilizar una herramienta de Análisis de Ruta. Esto consiste en usar el mapa de Coste y de



Vínculo, junto con unas entidades que definamos. El resultado es una línea o ruta que conecta los puntos de origen con los de llegada, siendo los caminos de menor coste acumulado.

Como se ha dicho antes se pueden aplicar diversos limitadores o favorecedores para este mapa de fricción, que en esencia es modificar esta capa de pendientes a aumentar, disminuir, añadir o eliminar zonas del análisis. Esto es útil cuando sabemos que hay condicionantes que no son los reales y por tanto hay que cambiar esta capa de fricción.

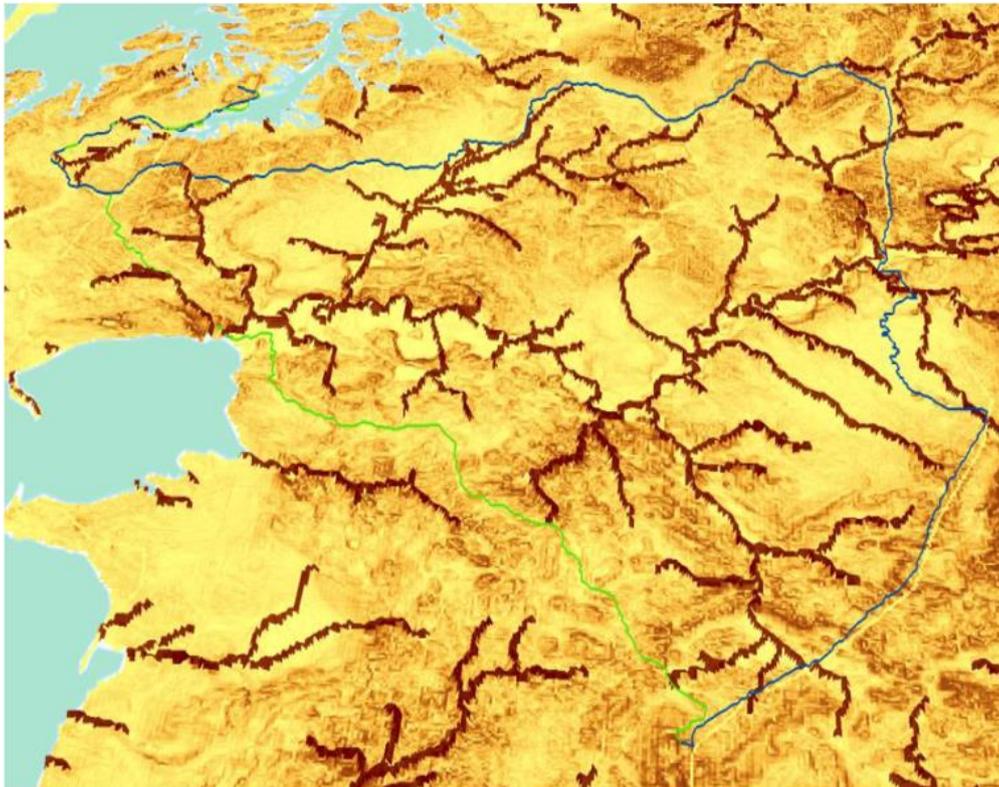
Un ejemplo actual que nos ayude a entender esto. Si hacemos un estudio de la movilidad de un coche por una carretera, si se encuentra en buen estado, sabemos que podemos ir por ley hasta 120 km/h, sin embargo, conocemos que si la pendiente es muy alta el coche puede ir más lento, así como si el asfalto de la carretera está agrietado y tiene agujeros, necesariamente tendremos que conducir con más cuidado. Puede ocurrir que una zona esté en obras y no sea posible transitar por ella. Estos condicionantes puntuales, tendríamos que localizarlos en el espacio y con alguna herramienta como es la Calculadora de Ráster, añadir la información de la misma. Siguiendo el ejemplo anterior, establecer un nivel de fricción más alta en la carretera en mal estado, disminuyendo por tanto la velocidad, o recortando del área de análisis de la parte en obras.

El criterio aplicado para solventar estos problemas, se puede visualizar con facilidad en el caso de los ríos y arroyos en épocas históricas. La naturaleza de las herramientas de Coste, consideran fundamentalmente la pendiente del terreno como principal criterio. Por ello una depresión suave, recta, sin ningún tipo de obstáculo es el área donde los análisis de coste muestran mayor facilidad de movilidad. Ahora bien, andar por encima de un río es imposible y atravesar determinadas masas de agua no es aconsejable (Melles *et al.* 2011). Más todavía si el desplazamiento lo estamos calculando para un vehículo de transporte cargado. Es necesario limitar la movilidad por estos espacios, como si de una carretera en mal estado se tratase, indicándole al sistema que no queremos discurrir por esa área. Para hacer esto, necesitamos una entidad lineal de arroyos y ríos y limitarlo en nuestra opinión se suelen hacer dos cosas (Fig. 1):

- Por un lado, podemos dificultar el paso, que consiste en generar de forma artificial un área difícil, usualmente multiplicando o añadiendo más pendiente al terreno. En este sentido se puede multiplicar, por ejemplo, por dos el valor de pendiente en áreas donde haya un obstáculo que puede ser salvado como un riachuelo. Otra opción sería multiplicar un valor, por ejemplo, por diez en el caso de obstáculos que sean verdaderas barreras, como un lago o un acantilado.
- Por otro lado, tenemos la opción es recortar del ráster quitando estas zonas. Este es el caso más radical, dado que impide que el algoritmo considere pasar por esa área, ya que no existe. El problema de usar este método, es que a veces, si es necesario desplazarse siguiendo el camino de un río, como puede ser en su vega cercana o atravesarlo.

En el caso de la movilidad acuática, no tiene el desarrollo investigador que, en el anterior, siendo la mayor parte de las aplicaciones sencillas al considerar la tecnología del barco a analizar. Es decir, en condiciones ideales, sabemos que determinado navío puede navegar a una velocidad media. Si no existen oleajes excesivos, corrientes fuertes, la visibilidad es buena y el viento es constante, el camino solo estará limitado por la línea de costa y eventualmente por zonas de bajos que podemos estudiar con la batimetría.

Figura 1. Ejemplo gráfico de la modificación al MDT para hacer correctamente un análisis de coste



Nota: si no se “eleva” los arroyos o eliminan, la herramienta considera la cuenca. En este ejemplo la línea verde el camino más corto al aplicar un gradiente pequeño, mientras que el azul es con una pendiente mayor.

7. Nuevas prácticas

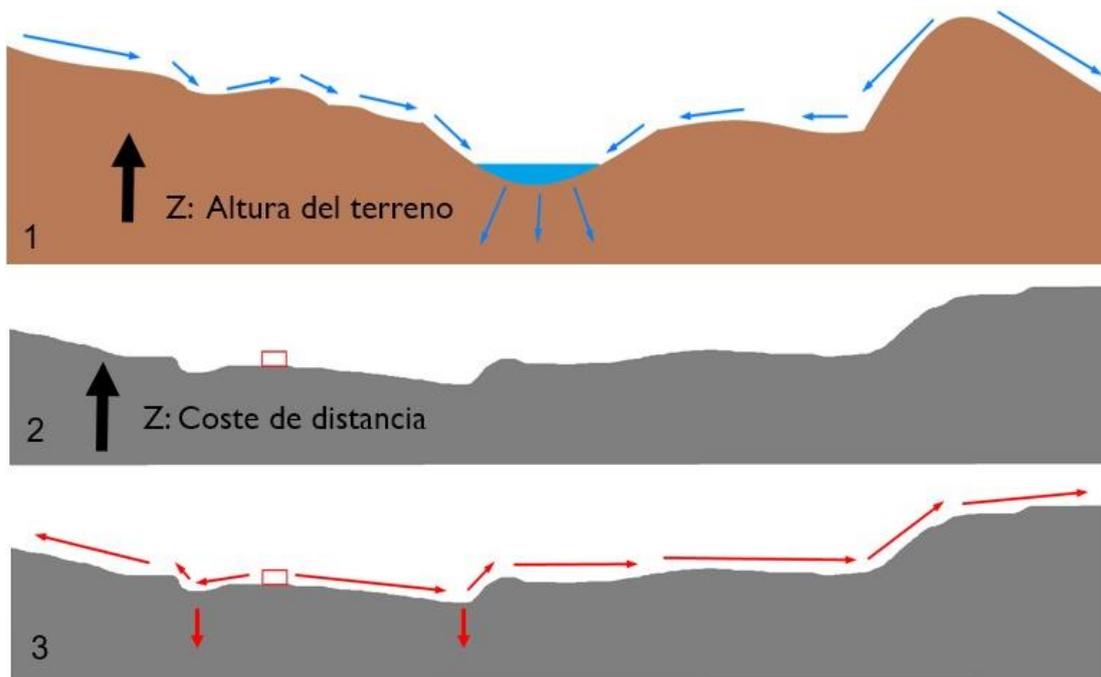
7.1. Movilidad terrestre

Como se ha podido ver en el punto anterior, la dificultad técnica del estudio de la movilidad requiere de un manejo básico y un profundo conocimiento histórico de lo que queremos investigar. En este apartado vamos a comentar brevemente algunas de las aplicaciones que consideramos más interesantes y que potencialmente ejemplifican las buenas prácticas en esta área de conocimiento.

Generalmente las nuevas prácticas que se han venido desarrollando mejoran y complican en muchos casos los preceptos que hemos indicado anteriormente. Sin embargo, la clave está en la conceptualización del modelo histórico que queremos indagar. Si nos paramos a pensar en la coyuntura histórica que nos interesa, estableciendo los criterios, sabiendo la mentalidad y como ha cambiado el paisaje, es posible realizar un análisis SIG mucho más fiable y que aporte información histórica. La problemática técnica sobre cómo realizarlo viene después, y actualmente existen suficientes herramientas disponibles para poder solventar casi todo antes de llegar a la programación.

Un caso destacado puede ser la aplicación del modelo MADO (Fábrega e Parcero, 2007; Llovera *et al.* 2011; Parcero *et al.* 2019). La principal limitación del análisis de ruta indicado en el punto anterior, es que solo podemos ver el mejor camino entre dos entidades. Con esta aplicación sabemos cuáles son corredores óptimos de conexión con un punto, a modo de red. Se trata de generar una superficie de movilidad potencial obtenida mediante la aplicación de un análisis hidrológico sobre una *ráster* de distancia de coste (Fig. 2). El concepto es bastante interesante dado que utilizamos un *ráster* de fricción, como lo hemos explicado anteriormente, pero a partir de métodos de análisis hidrológicos. De esta forma, el lugar de nacimiento del río o arroyo teórico generado es el punto de origen de movilidad y las áreas por donde discurre el flujo de agua, determinan los caminos más accesibles. Este es un buen ejemplo de aplicación, dado que se utiliza una herramienta sólida y accesible para solventar un problema metodológico. Además, su potencial es muy alto, dado que podemos combinar varios de estos análisis uno encima de otro. El resultado sería la red de comunicaciones teórica de distintos lugares. Si estas capas las sumamos, tendríamos los caminos óptimos por el territorio de muchas entidades distintas, lo cual supone en la práctica un modelo teórico para aproximarnos a los caminos secundarios. Por ejemplo, hemos hecho un análisis con este método en una ciudad romana, como es la colonia de Hasta Regia, donde esta red se genera con las distintas villas del territorio. El resultado muestra los caminos principales de conexión entre estos puntos (Autor 2019).

Figura 2. Esquema de funcionamiento del análisis MADO



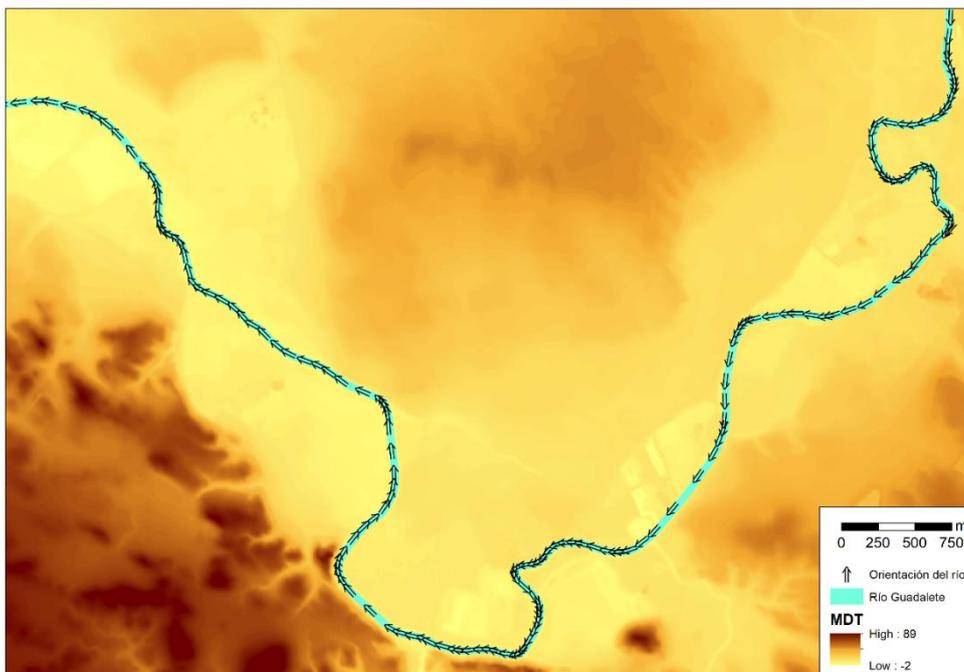
Nota: 1. Dirección de flujo de un análisis hidrológico normal, el agua discurre por la superficie y se acumula en las zonas de mayor captación como los ríos. 2. El rectángulo rojo simboliza una entidad que queremos analizar, como una ciudad. Si creamos un *ráster* de coste de distancia, el valor del mismo será la dificultad que tiene atravesar distintos terrenos (como es el monte o el río). 3. Si aplicamos la misma herramienta de hidrología que en el caso 1 pero sobre el *ráster* de coste, sacaremos diversos caminos óptimos, a modo de ríos, siempre desde el punto de origen.

7.2. Movilidad fluvial

El estudio de la movilidad en un río es muy interesante, dado que para época histórica son espacios que funcionarían como verdaderas carreteras de comunicación. Ciertamente tenemos la problemática en muchos casos de saber hasta qué punto un río sería navegable y con qué tipo de barco sería accesible. Sin embargo, en los análisis de movilidad terrestre están considerados como limitadores del movimiento, algo que ciertamente es contradictorio. Sabemos de ejemplos claros de comunicación fluvial, caso de la ciudad de Sevilla en España, con condicionantes que vienen anteriores, siendo el río Guadalquivir navegable más allá de la capital Corduba en época romana.

El principal problema técnico que tenemos para hacer un buen modelo histórico de este espacio, es que los condicionantes del movimiento son cambiantes dependiendo de la dirección en que nos movamos. Como todo análisis de movilidad, requerimos hacer un mapa de fricción, que difícilmente reflejará la realidad dado que el río facilitará la movilidad cuando se va a favor de la corriente y, al contrario. Hemos desarrollado una forma de calcular este tipo de condicionantes (Autor, 2021b), mediante el uso de herramientas que ya existían el mismo cálculo de coste de distancia. Brevemente, consiste en utilizar la herramienta de análisis horizontal. Hasta el momento hemos visto condicionantes que afecta en la verticalidad como es la pendiente. Volviendo al ejemplo del coche, un factor horizontal podría ser un viento fuerte en la carretera que tiende a desplazarlo hacia un lado. Conociendo el ángulo respecto al norte que tiene cada tramo de río que queremos analizar, es posible establecer los costes de distancia de un río (Fig. 3). Lo más importante de esta aproximación, es que podemos incluir dentro de un análisis de movilidad terrestre el río, ya no como un limitador, sino otro espacio más. Esto se relaciona de forma más clara con la realidad histórica, donde una persona podría coger un barco en un río y utilizarlo como medio de transporte, en vez de ir a pie.

Figura 3. Ejemplo de aplicación del factor horizontal en el río Guadalete



Nota: Por cada segmento de la línea que compone el río se calcula la orientación por lo que se puede analizar el coste si está a favor de la corriente, en contra e incluso al atravesar el río.

Ahora bien, para este tipo de aproximaciones no solo hay que considerar los costes en términos de tiempo energía, sino que se pueden usar otros conceptos como el del incremento de coste acumulado. Históricamente sabemos que no siempre la economía ha funcionado en oferta y demanda, sino que tenemos aproximaciones diversas a lo largo del tiempo y de las necesidades específicas. Por ejemplo, en época romana, podemos tener circuitos que funcionen mediante mercado, pero también administración imperial o incluso evergetismo (Duncan Jones, 1974; Remesal 1986; di Salvo, 1992; Chic, 2006). Por tanto, un modelo como el planteado es más real a las necesidades del momento, pudiendo verse si la vía navegable, abarata el transporte de mercancías o si, por el contrario, el coste en tiempo no es el relevante, sino que se busca la seguridad de una carga.

7.3. Movilidad marítima

Al igual que con el caso del río, la movilidad marítima tiene una serie de condicionantes todavía más complejos. Ya hemos indicado algunos de los factores que tenemos que considerar y que en general son más difíciles de modelar dado que no nos son accesibles. En tierra con MDT es suficiente para hacer algunas aproximaciones, mientras que en medio marino tenemos que crear el ráster de datos prácticamente de cero. Las prácticas que se hacen actualmente en este ámbito parten de la consideración de las condiciones de navegación históricas, principalmente de la tecnología naval, para elaborar unos mapas de condiciones óptimas (Leidwanger, 2013; Safadi, 2016; Gustas e Kisha, 2017; Jarriel, 2018; Harpster e Chapman, 2019). Por suerte, existen muchos datos actuales proporcionados por satélite que nos permiten crear las condiciones. Como ejemplo, en una aproximación reciente, hemos podido experimentar en el escenario Mediterráneo la navegabilidad de un barco de tecnología antigua, limitado por un oleaje excesivo, de cabotaje y otra serie de condicionantes (Autor 2022). Como en el caso anterior, la clave ha sido la consideración del factor horizontal, la dirección del viento, dado que es el valor que condiciona más estos modelos.

8. Perspectivas y discusión

En los ejemplos anteriores hemos observado el potencial que tiene la aplicación de SIG para construir modelos y responder preguntas históricas. Las investigaciones actuales cada vez tienen mayor potencialidad para realizar este tipo de análisis ya que contamos con mayor capacidad computacional y una mejor calidad de los datos espaciales accesibles.

Un ejemplo de ello lo tenemos en la aplicación de LiDAR bien para la teledetección, pero también para generar modelos digitales del terreno de alta resolución. Este tipo de recursos cada vez son más de acceso libre y permite generar modelos del terreno tremendamente precisos, por lo que entramos en toda una nueva línea de micro análisis (Poirier, 013; Chase *et al.* 2017; Monterroso, 2017; Lozis y Stular, 2021).

Hemos debatido sobre la cuestión de un mal uso de la herramienta, incurriendo en mala praxis por distintos motivos. Hemos indicado que el centro del análisis siempre debe ser la pregunta histórica, no utilizar el SIG como un fin en si mismo, sino como un medio para generar información empírica, especial o estadística que nos ayude a contrastar nuestras hipótesis.

Ahora bien, sobre esta temática existe una problemática sobre la visión frágil que se tiene de estos análisis, algo que se relaciona con este mal uso. Ciertamente la variación de un solo

parámetro puede dar lugar a dos resultados distintos, lo que da una aparente relatividad a los datos que se consiguen. Es por ello que existe la crítica historiográfica a este tipo de visiones. Si seguimos a Hacıguzeller (2012), podemos entender este tipo de estudios de una forma representativa y no representativa (representational and non-representational). La primera implica que el pasado tiene una realidad objetiva, inmutable que no podemos conocer directamente, por lo que el modelo a crear debe ser lo más fiel a esta realidad. La segunda se relaciona con que el pasado no es algo estático y que continuamente lo estamos redescubriendo y reconstruyendo en el presente.

Esta primera visión representativa es que consideramos genera esta visión crítica a la historia, dado que la búsqueda del modelo ideal siempre será una constante, pudiendo restarles valor a las diversas aproximaciones. Debemos aproximarnos a los modelos SIG desde una visión no representativa, pues es la forma observar una investigación en constante evolución y no como una solución instantánea generada por la herramienta.

Y es que en la labor investigadora en historia y arqueología el uso de los modelos SIG supone una mayor capacidad de análisis, al poder tener una visual general de los datos, que, de otra forma, no podríamos observar por la inmensidad de información, por tanto, la capacidad de analizar big data combinando información histórica y espacial (Verhagen, 2018). Estos datos generados, podrían considerarse como una nueva fuente de información, en el sentido que requieren un proceso de interpretación al igual que otros tipos de fuentes, como pueden ser las literarias. Cuando se analiza un texto tenemos que tener las prudencias convenientes sobre la traducción, cronología, intencionalidad del autor, etc. Esto quiere decir que si una fuente literaria dice algo concreto, no lo tomamos de forma monolítica, sino que abre todo un proceso de revisión y crítica. En este sentido la información geográfica modelada con SIG y bajo la premisa de preguntas históricas, puede generar un proceso similar.

Además, debemos destacar que debería ser el propio historiador o arqueólogo el que, sino hace el análisis, sea el que lidere el proceso. El ejemplo más claro lo tenemos en la práctica de ver el medio fluvial como limitador y no como vía de comunicación, ya que no obedece a criterios de conocimiento histórico. En todo caso, es un buen ejemplo de cómo los modelos históricos se han visto limitados por la herramienta SIG, haciendo que se desarrollen prácticas no bajo criterios de las condiciones y mentalidad del pasado, sino de la facilidad de análisis actual por la herramienta. La movilidad terrestre y marítima se considera en clave de potencialidades máximas, pero no suele analizarse la mentalidad y política de la época. Por ejemplo, en tiempos romanos para exportar productos entre provincias era necesario pagar un impuesto o portorium, que no estaba en todos los pasos y puertos (Pasquini, 2017). Una posible solución a estas cuestiones pasaría por que fueran los propios historiadores los que lleven este tipo de procesos. Sin embargo, el que se realicen modelos SIG de calidad pasa por una serie de cambios.

El primero es la de la propia formación, pues, aunque cada vez es más común incluir asignaturas específicas de SIG en los planes de estudio, estamos muy lejos de su aplicación general. La realidad es que muchos de los procesos y algoritmos que se utilizan en modelado, requieren de una formación específica muy amplia y con una gran curva de aprendizaje, por lo que no todos los usuarios tienen la formación. Esto ha dado lugar a todo un “negocio”, en los cursos externos de formación sobre estas temáticas, algo que habría que considerar con cuidado, ya

que la mayoría están liderados desde la visión de la herramienta y no de la pregunta histórica, enseñando como se hacen los procesos, pero no para que se hacen.

Una segunda cuestión es la brecha digital, generada principalmente por el elevado coste económico de determinados *software*. El referente actualmente para este tipo de aproximaciones es Arcgis, si bien están naciendo con fuerza otros *software* gratuitos como Qgis que potencialmente puedan llegar al mismo nivel de análisis. El problema surge en que la velocidad de avance de estas herramientas hace que una persona se forme en un determinado software y versión, algo que queda obsoleto en pocos años. Esto, unido al costo económico que tienen los *software* mas potentes, hace que no todo el mundo tenga las mismas capacidades.

Lo mismo ocurre a nivel de hardware, un ordenador medio del mercado es capaz de realizar análisis simples. Sin embargo, nos vemos generalmente limitados por las capacidades técnicas, especialmente en casos donde queramos gran precisión o análisis de muchos datos.

También podríamos considerar como diferenciador de esta brecha digital en el acceso y generación de información espacial. Dependiendo de la región o país tendremos acceso a un tipo u otro de información. Por ejemplo, desde modelos digitales del terreno de menos de medio metro de resolución en tiradas constantes cada pocos años, a lugares donde no tenemos más que la información recopilada por satélites como pueden ser de 25 metros. Esto supone que el avance en estas herramientas está también limitado tecnológicamente según el interés de los organismos públicos en realizar y compartir este tipo de información geográfica.

Por tanto, la brecha tecnológica es una realidad en la actualidad, aunque en años recientes se está popularizando el uso del software libre como medio de democratizar estos análisis. Sin embargo, el profesional formado en historia o arqueología generalmente parte un escalón por debajo de otras profesiones, como pudieran ser las ingenierías o similar, que ya tienen una buena base de estos conceptos y herramientas.

En tercer lugar, existe una cuestión inherente en la investigación histórica fruto del proceso de evaluación al investigador, el cual requiere de muchas publicaciones en poco tiempo, en revistas de alto impacto. Esto es una problemática actual dado que estamos entrando en un sistema cada vez más mercantilista, donde son los indicadores de editoriales y revistas los que priman sobre la calidad real de la publicación. Es muy probable que este sea el origen de muchos de los modelos que incurren en mala praxis, dado que es una aparente moda la inclusión de estas tecnologías. Una cosa es ilustrar con figuras un tema y otra muy distinta basarse en datos de las mismas para las hipótesis. De hecho, puede ocurrir que el análisis se utilice como pretexto para fundamentar unos resultados que previamente ya se habían resuelto.

Como perspectivas de futuro para la mejora en el uso de los modelos SIG, pensamos que debemos potenciar cuatro cuestiones:

La primera, es reforzar el valor de los análisis como una fuente de información más, buscando no modelos definitivos, sino más exactos a la realidad histórica y la disponibilidad de datos espaciales. Para ello hay que hacer las preguntas desde la historia, siendo en la medida de lo posible estos mismos profesionales quienes generen nuevas herramientas o modificación de las mismas.

En segundo lugar, pensamos que es importante continuar con la transferencia de conocimiento de metodologías usadas en SIG que puedan tener su aplicación en nuestro campo. Por ejemplo, se podrían incorporar los análisis multicriterio estadístico como una forma de ayuda a la toma de decisión (Saaty, 1994). Este tipo de usos podría ayudar a cambiar el paradigma a la hora de unificar criterios y solventar problemas historiográficos que no tienen aparente solución.

En tercer lugar, es prioritario que se compartan datos entre investigadores, generando una sinergia y transferencia con distintas unidades de investigación. En la comprobación de métodos por otras instituciones es donde se puede potenciar todavía más la certeza de estas aproximaciones. Por ejemplo, desarrollamos un modelo histórico para localizar las zonas óptimas de viñedo para época romana en el sur de la Península Ibérica, (Autor, 2016, 2021a) que después ha sido verificado por otras investigaciones (Stubert *et al.* 2020).

Por último, todavía falta mucho camino por recorrer, dado que una asignatura pendiente en este aspecto es que estas herramientas estén incorporadas en los currículos universitarios, al igual que sí existen en los estudios ambientales. Esto generará una masa crítica que sepa ponderar la importancia de un método u otro, pero más importante, sea capaz de aplicarlo. La realidad de los SIG es que para análisis simples solo hay que utilizar una herramienta ya creada. Sería labor de los propios investigadores de esta rama la labor de generar herramientas que simplifiquen determinados análisis democratizando su uso.

REFERENCIAS

- ALBERTI, Gianmarco. TRANSIT: a GIS toolbox for estimating the duration of ancient sail-powered navigation. *Cartography and Geographic Information Science*, v. 45, n. 6, pp. 510-5281, 2018.
- BAEK, Jieun; CHOI, Yosoon. A new algorithm to find raster-based least-cost paths using cut and fill operations. *International journal of geographical information science*, v. 31, n. 11, pp. 2234-2254, 2017.
- BRUGHMANS, Tom. Thinking through networks: A review of formal network methods in archaeology. *Journal Archaeological Method Theory*, v. 20, n. 4, pp. 623–662, 2013.
- BURFORD, Alison. Heavy transport in classical antiquity. *The Economic History Review*, v. 13, n. 1, pp. 1-18, 1960.
- CARRERAS, Cesar; DE SOTO, Pau; MUÑOZ, Aina. Land transport in mountainous regions in the Roman Empire: Network analysis in the case of the Alps and Pyrenees. *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 25, pp. 280-293, 2019.
- CHASE, Adrian; CHASE, Diane; CHASE, Arlen. Chapter 4 LiDAR for Archaeological Research and the Study of Historical Landscapes. Em: Nicola Masini; Francesco Soldovieri (eds.), *Sensing the Past, Geotechnologies and the Environment*. New York: Springer International Publishing, pp. 89-100, 2017.
- CHIC GARCÍA, Genaro. *Economía de prestigio "versus" economía de mercado*. Sevilla: 2006.
- COLLISCHONN, Walter; PILAR, Jorge Victor. A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 14, n. 4, pp. 397-406, 2000.

- DI SALVO, Lietta. *Economia private e pubblici servixi nello Imperio romano. I corpora navicularium*. Messina, 1992.
- DUNCAN JONES, Richard. *The Economy of the Roman Empire: Quantitative Studies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1974.
- FÁBREGA ÁLVAREZ, Pastor; PARCERO OUBIÑA, César. Proposals for an archaeological analysis of pathways and movement. *Archeologia e Calcolatori*, v. 18, pp. 121-140, 2007.
- FONTE, João; PARCERO OUBIÑA, César; COSTA GARCIA, José Manuel. A GIS-based analysis of the rationale behind roman roads. The case of the so-called via XVII (NW Iberian Peninsula). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, v. 17, n. 3, pp. 163-189, 2017.
- GRAU, Ignacio. *La aplicación de los SIG en arqueología del paisaje*. Alicante: Universidad de Alicante, 2006.
- GUSTAS, Robert; KISHA Supernant. Least cost path analysis of early maritime movement on the Pacific Northwest Coast. *Journal of Archaeological Science*, v. 78, pp. 40-56, 2017.
- HACIGUZELLER, Piraye. GIS, critique, representation and beyond. *Journal of Social Archaeology*, v. 12, n. 2, pp. 245-263, 2012.
- HAISMAN, M.; GOLDMAN, R. Effect of terrain on the energy cost of walking with back loads and handcart loads. *Journal of Applied Physiology*, v. 36, pp. 545-548, 1974.
- HARPSTER, Matthew; CHAPMAN, Henry. Using polygons to model maritime movement in antiquity. *Journal of Archaeological Science*, v. 111, pp. 104997–10516, 2019.
- HERZOG, Irmela. Theory and practice of cost functions. Em: Contreras Francisco; Farjas Mercedes; Melero, Javier (eds.). *Proceedings of the 38th annual conference on computer applications and quantitative methods in archaeology*. Oxford: BAR International Series, pp. 375-382, 2010.
- HERZOG, Irmela. A review of case studies in archaeological least-cost analysis. *Archeologia e Calcolatori*, v. 25, pp. 233–239, 2014.
- JARRIEL, Katherine. Across the surface of the sea: Maritime interaction in the cycladic early bronze age. *Journal of Mediterranean Archaeology*, v. 31, n. 1, pp. 52-76, 2018.
- LEIDWANGER, Justin. Modeling distance with time in ancient Mediterranean seafaring: A GIS application for the interpretation of maritime connectivity. *Journal of Archaeological Science*, v. 40, n. 8, pp. 3302–3308, 2013.
- LLOBERA, Marcos; FÁBREGA ÁLVAREZ, Pastor; PARCERO OUBIÑA, César. Order in movement: a GIS approach to accessibility. *Journal of Archaeological Science*, v. 38, pp. 843-851, 2019.
- LLOBERA, Marcos; SLUCKIN, Timothy. Zigzagging: theoretical insights on climbing strategies. *Journal of Theoretical Biology*, v. 249, n. 2, pp. 206-217, 2007.
- LOZIC, Edisa, STULAR, Benjamin, Documentation of Archaeology Specific Workflow for Airborne LiDAR Data Processing. *Geosciences*, v. 11, n. 26, 2021.
- MAYORAL HERRERA, Victorino; PARCERO OUBIÑA, César; FÁBREGA ÁLVAREZ, Pastor. (eds.). *Archaeology and Geomatics. Harvesting the benefits of 10 years of training in the Iberian Peninsula (2006-2015)*, Leiden: Sidestone Press, 2016.

- MELLES, Stephanie; JONES, Nicholas; SCHMIDT, Beata; RAYFIELD, Bronwin. A least-cost path approach to stream delineation using lakes as patches and a digital elevation model as the cost surface. *Procedia Environmental sciences*, v. 7, pp. 240-245, 2011.
- MILHEIRA, Rafael Guedes; DE SOUZA, Jonas Gregorio; IRIARTE José. Water, movement and landscape ordering: A GIS-based analysis for understanding the mobility system of late Holocene mound-builders in southern Brazil. *Journal of Archaeological Science*, v. 111, pp. 105014–105026, 2019.
- MÍNGUEZ GARCÍA, Carmen; CAPDEVILA MONTES, Enrique. (Coords.). *Manual de tecnologías de la información geográfica aplicadas a la Arqueología*. Madrid: Comunidad de Madrid, 2016.
- MONTERROSO CHECA, Antonio. Remote Sensing and Archaeology from Spanish LiDAR-PNOA: Identifying the Amphitheatre of the Roman City of Torreparedones (Córdoba-Andalucía-Spain). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, v. 17, n. 1, pp. 1-8, 2017.
- PARCERO OUBIÑA, César, GÜMIL FARIÑA, Alejandro, FONTE, João; COSTA GARCIA, José Manuel. Footprints and Cartwheels on a Pixel Road: On the Applicability of GIS for the Modelling of Ancient (Roman) Routes BT - Finding the Limits of the Limes: Modelling Demography, Economy and Transport on the Edge of the Roman Empire. Em: Verhagen Philip; Joyce Jamie; Groenhuijzen Mark (eds.), *Finding the Limits of the Limes*. New York: Springer International Publishing, pp. 291–311, 2019.
- PASQUINI, Béline. Preposition of a method to determine portages routes: the example of the connection between the Saône and the Moselle rivers (France) in ancient times. Em: O'Sullivan Rebecca; Marini, Christina; Binnberg Julia (eds.), *Archaeological approaches to breaking boundaries: interaction, integration and division (BAR International)*. Oxford: British Archaeological Reports Oxford, 2017.
- POIRIER, Nicolas, OPITZ, Rachel, NUNINGER, Laure, OSTIR, Kristof. Lidar in Mediterranean agricultural landscapes: reassessing land use in the Mauguio. *HAL - Archives-Ouvertes*, pp. 1-17, 2013.
- REMESAL RODRÍGUEZ, José. *La annona militaris y la exportación de aceite Bético a Germania*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 1986.
- SAATY, Tomas. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh: RWS Publications, 1994.
- SAFADI, Crystal. Wind and wave modelling for the evaluation of the maritime accessibility and protection afforded by ancient harbours. *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 5, pp. 348-360, 2016.
- SARRIS, Apostolos (Ed), *Best Practices of GeoInformatic Technologies for the Mapping of Archaeolandscape*. Oxford: Archaeopress Archaeology, 2015.
- SCHEIDEL, Walter; MEEKS, Elijah. ORBIS. The Standard Geospatial Network Model of the Roman World. 2022. Disponible em: <https://orbis.stanford.edu/>. Acceso em: 14 Abril. 2022.
- STUBERT, Lisa; MARTÍN I OLIVERAS, Antoni; MÄRKER, Michael; SCHERNTHANNER, Harald; VOGEL, Sebastian. Viticulture in the Laetanian Region (Spain) during the Roman Period: Predictive Modelling and Geomatic Analysis. *Geosciences*, v. 10, n. 206, pp. 1-28, 2020.
- TOBLER, Waldo. Three presentations on geographical analysis and modeling: non-isotropic geographic modeling; speculations on the geometry of geography; and global spatial analysis. *Technical Report*, pp. 93-1, 1993.



- VERBRUGGHE, Gerben; DE CLERCQ, Wim; VAN VEERLE, Eetvelde. Routes across the Civitas Menapiorum: Using least cost paths and GIS to locate the Roman roads of Sandy Flanders. *Journal of Historical Geography*, v. 57, pp. 76-88, 2017.
- VERHAGEN, Philip. Spatial Analysis in Archaeology: Moving into New Territories BT. Em: Christoph Siart; Markus Forbriger; Olaf Bubbenzer (eds.), *Digital Geoarchaeology: New Techniques for Interdisciplinary Human-Environmental Research*. New York: Springer International Publishing, pp. 11-25, 2018.
- VERHAGEN Philip; NUNINGER, Laure; GROENHUIJZEN, Mark. Modelling of Pathways and Movement Networks in Archaeology: An Overview of Current Approaches. Em: Verhagen, Philip; Joyce Jamie; Groenhuijzen Mark (eds.) *Finding the Limits of the Limes. Computational Social Sciences*. Nueva York: Springer International Publishing, pp. 217-249, 2019.
- WHITE, Devin Alan. The Basics of Least Cost Analysis for Archaeological Applications. *Advances in Archaeological Practice*, v. 3, n. 4, pp. 407-414, 2015.