

CÁLCULO DE RUTAS ÓPTIMAS MEDIANTE SIG EN EL TERRITORIO DE LA CIUDAD CELTIBÉRICA DE SEGEDA. PROPUESTA METODOLÓGICA

RAÚL LÓPEZ ROMERO¹

RESUMEN: en este artículo se muestra una propuesta metodológica para el cálculo de rutas óptimas entre yacimientos de un mismo momento cronológico. Este modelo ha sido aplicado sobre asentamientos celtibéricos del entorno de la ciudad-estado de Segeda. Se concluye con una valoración sobre los resultados obtenidos y su utilización en los trabajos de Arqueología Espacial.

PALABRAS CLAVES: SIG, rutas óptimas, Modelo Digital de Elevaciones, fricción y Arqueología Espacial.

1. Introducción

La temática de este trabajo se debe encuadrar dentro de las diversas líneas de investigación que se están realizando en el Proyecto Segeda, desarrollado desde 1998 y dirigido por el profesor Francisco Burillo Mozota, y que tiene como objetivo principal el estudio de la ciudad-estado celtibérica de Segeda y su territorio.

En este trabajo presentamos un ejemplo de elaboración de un modelo predictivo, como son los cálculos de Rutas Óptimas, para el estudio de un territorio arqueológico. La zona de aplicación de este estudio ocupará el territorio que jerarquizaría la ciudad-estado de Segeda, aunque no obstante, en esta primera fase, nos hemos ceñido a un rectángulo de 37,1km x 42,1 km, (1561,91 km²) en torno a dicha ciudad celtibérica, obligados por la necesidad de aplicación de los modelos raster y para facilitar la presentación de las herramientas SIG en este trabajo.

La mayor parte del territorio seleccionado ocupa la Comarca de Calatayud (aproximadamente el 90%, el resto corresponde a las Comarcas de Valdejalón y de Aranda). Un territorio que destaca por su escarpado entorno con fuerte cortes o saltos producidos por el paso del río Jalón. El límite Norte lo marca la Sierra de la Virgen que es separada de la Sierra de Vicort por el propio Jalón. Al oeste se desarrolla la sierra de Almantes y las estribaciones finales de la sierra Caballero. Por el Este se despliegan las alineaciones del Espigar y el Campo Alto, altiplanicie que divide las cuencas del río Perejiles y el Jiloca. Por el sur cierra el territorio las sierras de Atea y de Pardos.

La comarca de Calatayud se encuentra drenada principalmente por el río Jalón que la cruza dirección SO-NE. En él vierten sus aguas el río Jiloca (SE-NO) y paralelo a éste, el Perejiles (SE-NO), cuyo caudal actual es bastante menor que el de los dos anteriores. En la ver-

¹ Este trabajo se ha realizado gracias a la concesión de una beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), por parte del Ministerio de Educación y Ciencia y del Proyecto I+D: HUM

2005-03369/HIST financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y los fondos FEDER. Miembro del Grupo Hiberus (Gobierno de Aragón).

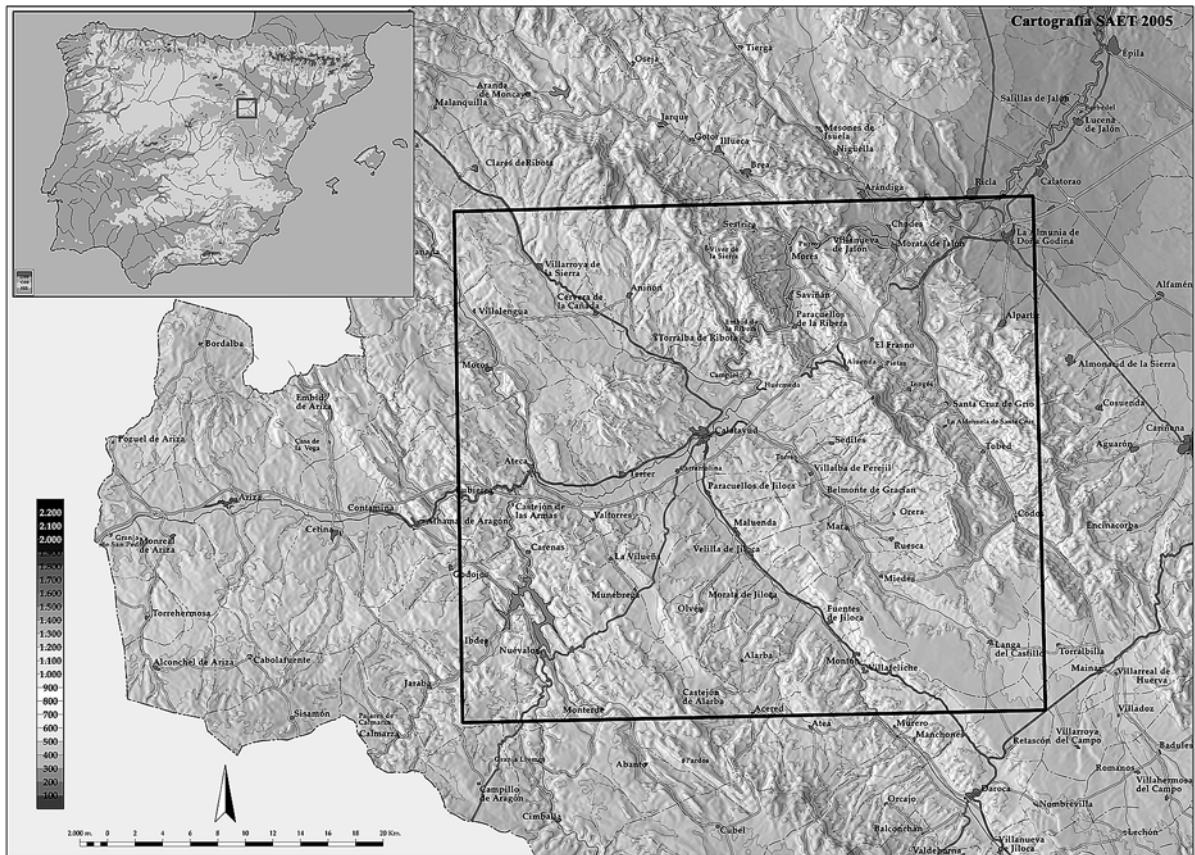


Figura 1. Zona de aplicación de las Rutas Óptimas.

tiende norte de la sierra de Vicort discurre el río Grío que desagua en el Jalón. Por la vertiente izquierda la rambla del Ribota que es el principal sistema de drenaje, desembocando en el Jalón.

Históricamente nos encontramos ante una zona de paso del Valle del Ebro a la meseta castellana y desde estas a la zona turolense. Una encrucijada de caminos, que en la actualidad se manifiesta por vías de comunicación tan importantes como la Autovía A-II que une Madrid con Barcelona y la línea de AVE Madrid-Lleida (Fig. 1).

2. Arqueología, Sistemas de Información Geográfica y Territorio

Los asentamientos estables del valle medio del Jalón presentan en la II.^a Edad del Hierro una complejidad social que se evidencia en la aparición del estado de Segeda. La formación

de dicho estado produjo una serie de procesos evolutivos en el territorio desde el periodo del Bronce Medio, que posibilitaría la paulatina formación de una jefatura territorial en Segeda que culminará con el enfrentamiento con Roma en el año 153 a.C., que marcaría el final de esta ciudad y la aparición de un nuevo paisaje político, con desplazamiento del estado a la nueva ciudad de Segeda, situada en el inmediato Durón de Belmonte de Gracián (BURILLO, 1999 y BURILLO, 2001).

Los estudios sobre el territorio se han visto cercenados por el vacío en el conocimiento del entorno rural de la ciudad-estado de Segeda. La necesidad de completarlo conllevó al desarrollo de una línea de investigación centrada en la evolución histórica de su territorio circundante desde los inicios de la formación del estado segedense hasta la etapa de interacción con Roma, con el fin de buscar aclarar cómo afectó estos importantes cambios históricos en el entorno rural celtibérico. Desde un principio, se

consideró indispensable el apoyo de los trabajos de las nuevas tecnologías informáticas, en especial, de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), puesto que son herramientas que nos permiten el manejo de un gran volumen de información espacial.

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los trabajos de investigación arqueológica sufrieron un considerable aumento, a partir de la publicación de la obra de Allen, Green y Zubrow (1990), libro que dio a conocer, desde una perspectiva arqueológica, como se debía estructurar, almacenar y modelar la información localizada en un espacio geográfico. Posteriormente, surgirán otra serie de obras de carácter demostrativo, tanto a nivel internacional como nacional, que expondrán la paulatina incorporación y evolución de los SIG en la disciplina arqueológica como herramienta de apoyo para el manejo y organización de la cuantiosa información espacial, pero también como una tecnología que ayudase a la interpretación de la interacción entre un yacimiento arqueológico y su territorio (LOCK y STANCIC, 1995; BAENA, BLASCO y QUESADA, 1997; GILLINGS, MATTINGLY y DALEN, 1999; WHEATLEY y GILLINGS, 2002).

Por ello, podemos afirmar que la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica ha permitido una mejora sustancial de la gestión e investigación arqueológica. No obstante, la mayoría de los trabajos desarrollados en Europa han tenido la finalidad de inventariar y gestionar el extenso patrimonio arqueológico de las áreas urbanas de ciudades históricas (p.e. MARTINS y DANTAS, 2001), regiones (p.e. KUNA, 2002) e incluso países (p.e. MAYER, 2002). En nuestro país contamos con grandes ejemplos, como los trabajos desarrollados por el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (IAPH) y la Universidad de Sevilla, que desde mediados de los años 90 han desarrollado e implantado el Sistema de Información del Patrimonio Arqueológico de Andalucía *ARQUEOS*, a partir del cual han unificado tecnología y patrimonio con la finalidad de mejorar la gestión de la información arqueológica de la Comunidad Autónoma de Andalucía (FERNÁNDEZ CACHO, 2002; FERNÁNDEZ CACHO, 2004). También debemos destacar los trabajos desarrollados con SIG por el equipo de

C. Blasco y J. Baena para la construcción y gestión de la carta arqueológica de Madrid (BLASCO y BAENA, 1999; BLASCO, BAENA y CARRIÓN, 2004), así como el primer desarrollo del Inventario Arqueológico de Aragón, que configuró una Base de Datos y una ficha general de yacimientos informatizada con la intención de desarrollar un Sistema de Información Geográfico para toda la Comunidad Autónoma de Aragón (BURILLO e IBÁÑEZ, 1990; BURILLO, IBÁÑEZ y POLO, 1993). También tenemos ejemplo de SIG desarrollados en ciudades históricas como el caso de Montilla (Córdoba) (NAVARRO y ORTÍN, 2004), Tarragona (IGNACIO FIZ, 2001-2002) o Barcelona (CABRAL RODRÍGUEZ, 2004). Sin embargo, aunque en estos años ha existido una importante implantación de los SIG en la gestión del patrimonio arqueológico a nivel local y regional, todavía se echa en falta un proyecto común para todo el país y el ámbito de la Comunidad Económica Europea, el cual posibilite la unificación de criterios y resultados, mejorando la protección e investigación de nuestro extenso patrimonio arqueológico.

Por el contrario, los trabajos donde se han aplicado los SIG para la investigación arqueológica han sido bastante menos. Los pocos arqueólogos que se han apoyado en esta herramienta han realizado únicamente sencillos cálculos como son los polígonos Thiessen, cálculo de medidas y distancias a recursos concretos o yacimientos y para mejorar otros cálculos como serán los de visibilidades o intervisibilidades (p.e. ALCAZAR, 1998; GÁLVEZ y ACERO, 2004 y BERMÚDEZ, 2004).

3. Rutas Óptimas. Modelos predictivos de articulación de un territorio

La gran versatilidad de los Sistemas de Información Geográfico permiten su utilización para la construcción de los llamados modelos predictivos, que se caracterizan por ser una aproximación teórica a un problema que será recomprobado posteriormente en el terreno de forma empírica.

La realización de estos modelos no va a ser muy común para los investigadores europeos, siendo más del agrado de los investigadores del

continente americano, con el fin preferente de la búsqueda de yacimientos en sus extensos territorios. No obstante, los que más se han desarrollado en el viejo continente son los cálculos de rutas óptimas, donde se plantea la posibilidad de acercarse al conocimiento de las vías de comunicación existentes en un periodo cronológico concreto.

Desde siempre uno de los mayores problemas de los investigadores era analizar las rutas y caminos de los grupos humanos prehistóricos, en especial en aquellas zonas que por sus características topográficas las posibilidades son múltiples. Los recursos existentes para el conocimiento de las redes de comunicación en fases antiguas eran muy limitados. Los investigadores solían relacionar antiguas cañadas ganaderas o rutas naturales como vías tradicionales de comunicación que habrían sido utilizadas desde tiempos inmemorables. Sin embargo, desde hace unos años se ha empezado a considerar que puede existir una serie de elementos y factores sociales que pueden condicionar la movilidad de los grupos humanos, por tanto, se empieza a sumar a los atributos naturales del terreno otros posibles elementos culturales que pudiesen actuar para atraer o repeler una vía de comunicación (LLOBERA, 2000).

Las posibilidades que ofrecen los SIG para el cálculo de rutas óptimas nos han abierto nuevos caminos a la investigación arqueológica. Con el cálculo acumulado de estos caminos, se plantea la posibilidad de acercarnos al conocimiento de las redes de comunicación existentes en cada fase y zona de interés. No obstante, los resultados obtenidos sólo permiten conocer hipotéticas vías de comunicación donde el esfuerzo de un desplazamiento es menor. Por ello, es indispensable analizar posteriormente estas posibles rutas añadiendo la influencia de elementos culturales o sociales. De este modo, el cálculo de rutas óptimas necesita de una posterior comprobación empírica de los resultados obtenidos, así como de un análisis crítico donde se intente valorar las circunstancias que llevó a su formación.

En nuestro país podemos documentar varios precedentes de desarrollo de rutas óptimas, el primer trabajo sería el desarrollado por el equipo de la Universidad Autónoma de Madrid

para la restitución del trazado del acueducto romano de Cádiz (ROLDÁN, et alii, 1999). Desde este momento esta universidad se convertirá en un referente sobre esta materia, debido sobre todo a los trabajos desarrollados por J. Bermúdez (2000; 2004a y 2005), que en su tesis doctoral ya presentaba una primera valoración de los resultados obtenidos en el intento del cálculo de rutas óptimas para el Calcolítico Final-Bronce Inicial en la Campiña cordobesa, trabajo que ha continuado desarrollando utilizando nuevos datos y aplicando nuevas rutinas de cálculo. Posteriormente se desarrollará un foco en la Universidad de Alicante, donde destacan los cálculos de rutas óptimas realizados en la Contestania Ibérica por I. Grau (2002), donde observó la coincidencia de los caminos computados con rutas de comunicación existentes, siguiendo sus mismos criterios S. Fairén (2004) que aplica las rutas óptimas como elemento articulador del paisaje prehistórico. También quisiéramos destacar los primeros trabajos realizados para el territorio de Segeda (BURILLO, ESCOLANO y RUIZ, 2004) predecesores del estudio que en la actualidad estamos desarrollando.

Por ello, en este trabajo queremos mostrar un enfoque experimental de la utilización de las herramientas SIG en la investigación arqueológica, donde propondremos un ejemplo metodológico de aplicación de diferentes variables para el cálculo de rutas óptimas para la ciudad-estado celtibérica de Segeda con respecto a una serie de yacimientos celtibéricos coetáneos a esta ciudad.

4. Fundamentos para el cálculo de rutas óptimas

Los módulos de cálculos de rutas de los programas SIG basan su análisis en el cálculo de valores acumulativos de las diferentes celdillas o píxeles de una determinada capa raster. Dicha capa representará la dificultad o coste de desplazamiento de un determinado territorio, de este modo el programa podrá seleccionar la ruta para unir dos puntos determinados donde la suma de los valores de todas las celdillas atravesadas sea la más baja y por tanto la que equivaldrá a un menor esfuerzo en el despla-

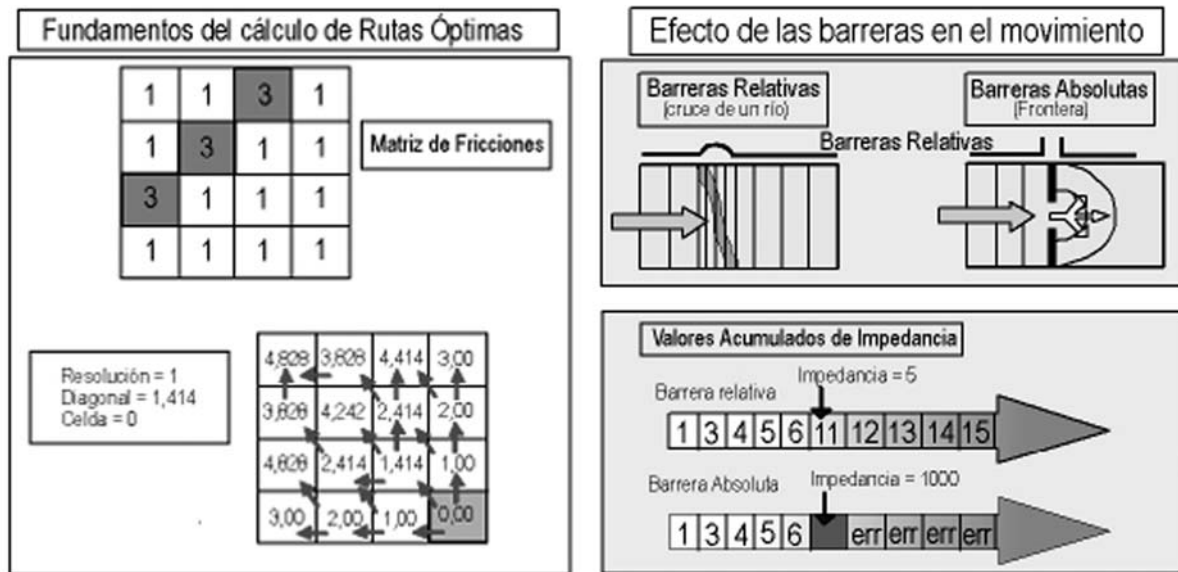


Figura 2. Esquema de los fundamentos del cálculo de Rutas Óptimas. Elaboración según Demers, M.N. (1996).

zamiento. Los resultados finales obtenidos dependerán en gran medida de los factores o variables utilizados para la elaboración de dicha capa raster, siendo indispensable plantear cuales vamos a utilizar en la construcción de ésta. Consideramos, por tanto, necesaria una reflexión inicial sobre qué tipo de variables pueden afectar al desplazamiento de un ser humano por un territorio, favorecer o repeler la atracción de una ruta de comunicación. De este modo, podemos analizar qué zonas son menos costosas para el desplazamiento de una persona por un determinado territorio (Fig.2).

5. Selección de los factores naturales y culturales para la elaboración de Rutas Óptimas

La selección de las variables para la elaboración de un cálculo de rutas óptimas es un tema determinante porque de ellas dependerán en gran medida los resultados finales que obtengamos. Por su temática podríamos dividirlos en variables o factores naturales principalmente el relieve u orografía del terreno, aunque también se podrían incluir otros como serían los cursos de agua, los tipos de suelo o la vegetación, sin embargo, todos estos factores presentan el inconveniente de que normalmente se trabaja con datos actuales y muy generales, por lo que es muy difícil acceder a datos paleoambientales

exactos. El otro grupo de factores serían los culturales tales como fronteras políticas, existencia de caminos o puentes previos que pudieron ser utilizados y determinados elementos o puntos del territorio que creasen una voluntad de evitarlos o acercarse a ellos por que tuviesen un significado social o ritual añadido (LLOBERA, 1999).

En esta propuesta metodológica únicamente utilizaremos tres variables naturales como serán el relieve o pendiente, los cursos de agua y la vegetación. De estas, la única indispensable sería el relieve. Como demuestran algunos autores en sus trabajos la orografía es el factor más importante para el cálculo de las rutas óptimas de un territorio basando su análisis prácticamente en esta variable (BERMÚDEZ, 2004; y FAIRÉN, 2004). No obstante, no hay que olvidar que los datos del relieve que se utilizan son de la orografía actual, la cual ha sufrido importantes cambios con respecto a los existentes en épocas pretéritas siendo los resultados obtenidos orientativos.

Para la variable del relieve es necesario la construcción de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Este se realiza a partir de las curvas de nivel, transformando éstas en una malla continua de celdas donde cada una contendrá la información de la irregularidad del terreno que representa, es decir, su altura.

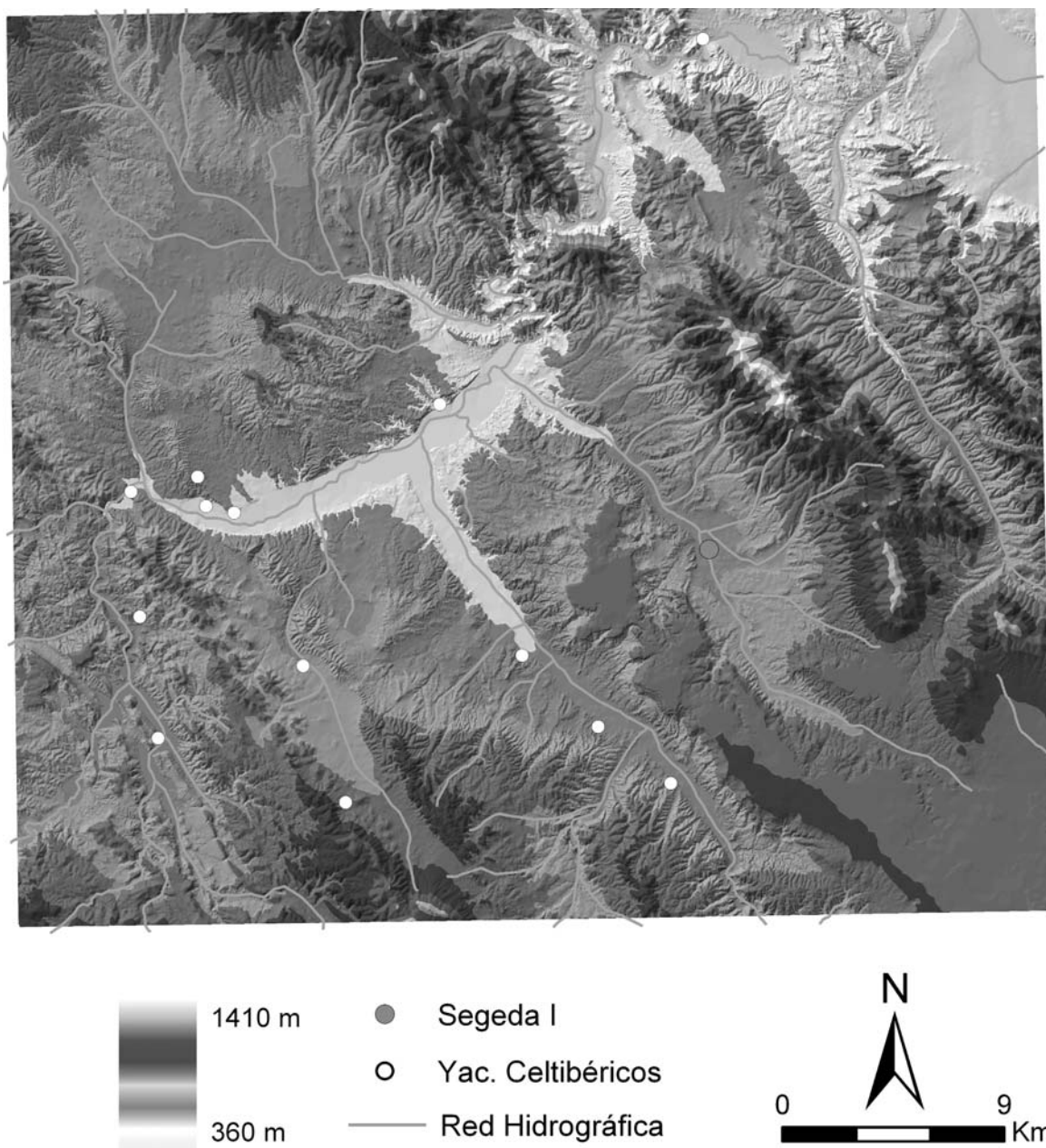


Figura 3. TIN de la zona de estudio.

El MDE utilizado en este caso tendrá un tamaño de píxel de 5 m de lado (25 m^2), realizado con curvas de nivel digitalizadas de los mapas 1:25000 del IGN. Estas curvas fueron tratadas y revisadas eliminando de ellas elementos que distorsionasen los resultados como vías

ferreas, autovías, etc. Con estas curvas de nivel se realizó un TIN (*Triangulated Irregular Network*)², el cual transformaremos en un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).(Fig. 3).

Este MDE lo transformamos en un mapa raster de las pendientes del terreno en grados (0

² Un TIN es una capa vectorial que representa tridimensional la topografía de un terreno mediante una serie de caras de triángulos conectadas por una triangulación de Delaunay de puntos de obser-

vación (cotas) irregularmente distribuidos (Wheatley y Gillings, 112-113).

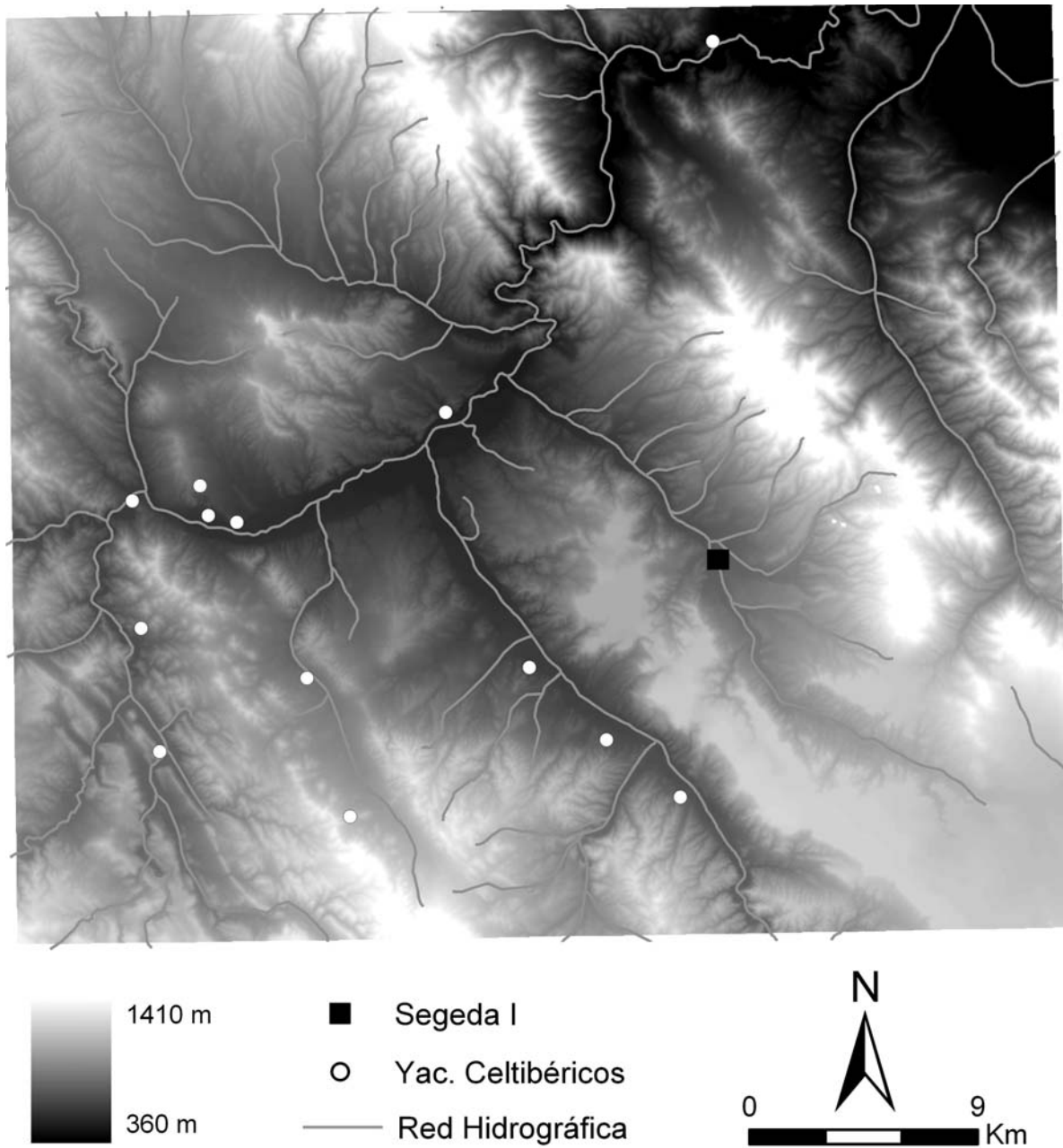


Figura 4. MDE desarrollado a partir de un TIN.

- 90°). La aplicación de la variable del relieve en las rutas óptimas se fundamenta en que la distancia recorrida variará en tiempo según la inclinación del terreno, para ello reclassificamos esta capa dando un valor determinado según el grado de desnivel existente. De esta manera, la pendiente será un factor esencial a la hora de examinar las posibilidades de desplazamiento sobre un terreno, siendo lógicamente más factible en los lugares más llanos que en los más escarpados. El mayor problema se encuentra a la hora

de aplicar los criterios de reclasificación de estos valores. Existirán dos criterios de clasificación:

-El *Isotrópico* donde se mantiene un valor continuo independientemente de su dirección, por tanto se considera que el esfuerzo aplicado en el ascenso de una pendiente es de forma constante.

-El *Anisotrópico*, relacionando la energía consumida con el grado de pendiente, donde se

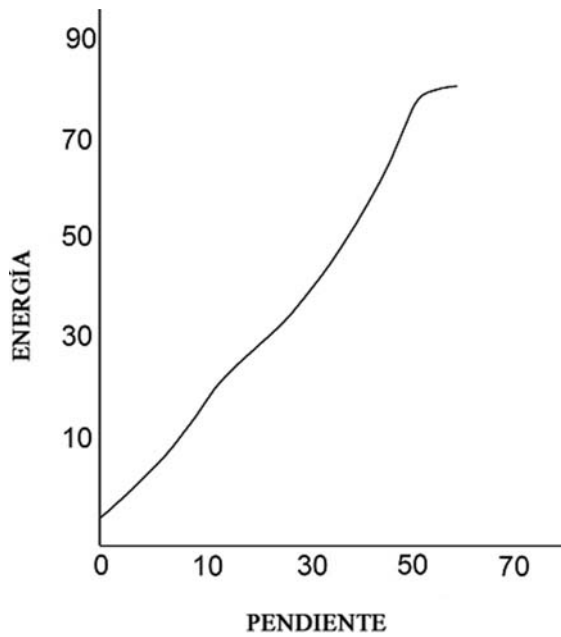


Figura 5. Relación energía - pendiente el desplazamiento según Llobera. Fuente: Wheatley y Gilling, 2002.

considera que el gasto energético varía según el grado de pendiente, por tanto de forma irregular y no constante.

Estos criterios se asientan en estudios psicomotrices, señalándose insistentemente que la pendiente es un factor anisotrópico, porque obviamente invertimos un esfuerzo diferente, y en general mayor, para ascender una cuesta que para descenderla. Debido a la importancia dada a la pendiente como factor para reconocer la accesibilidad a un territorio o el trayecto más económicos entre dos puntos, ha sido objeto de numerosos estudios interpretativos de la relación de esfuerzo respecto a la pendiente (ERICSSON y GOLDSTEIN, 1980; GORENFLO y GALE, 1990). En nuestro caso, decidimos aplicar los estudios de M. Llobera (1999) donde tras varios estudios comparativos creó un eje de valores donde relacionaría la energía consumida por una persona según el tipo de pendiente que atravesaba (Fig 5).

Siguiendo estos criterios se realiza una reclasificación de esta capa dando como resul-

tado un mapa del grado de dificultad relativo que la pendiente supone para el desplazamiento humano (Fig. 7). Los valores utilizados variarán desde el gasto de 6 de las zonas más llanas hasta los 84 de las superiores a 50° grados. Estos últimos como se suponen muy difícil para el desplazamiento se les dio un valor exagerado de 1000 creando una zona de exclusión porque los valores obtenidos siempre serán muy altos y nunca seleccionados por el ordenador (Fig. 6).

El siguiente factor que se aplica fueron los **cursos de agua** del territorio de estudio. Al igual que con las pendientes, la capa fue clasificada siguiendo unos criterios de esfuerzo. En este caso se consideró que la dificultad de desplazamiento aumentaría en el caso de atravesar un gran cauce como el río Jalón que un pequeño barranco. De este modo se reclasificaron en cinco categorías dependiendo del caudal que transportasen (Fig. 8)³.

No obstante, como se observa en la figura 7 el crecimiento del esfuerzo en cruzar los cursos de agua son mínimos, exceptuando los cauces mayores del territorio (río Jalón, Jiloca, y Perejiles), debido a que probablemente ninguno de ellos han sido nunca un impedimento para ser cruzado en cualquiera de sus tramos. Aunque, era indispensable otorgarles un cierto valor de fricción, puesto que si no las pendientes de estos actuarían como rutas idóneas, solapándose las

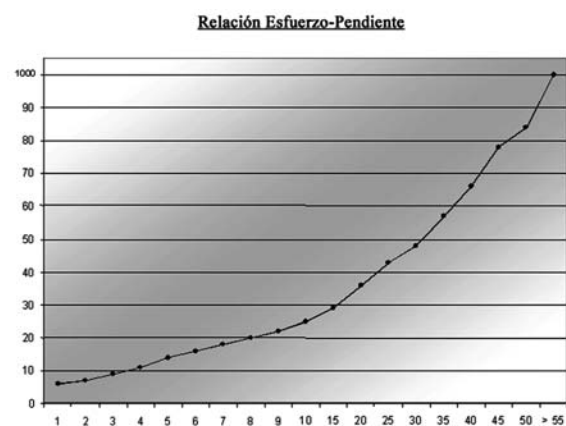


Figura 6. Valores aplicados de esfuerzo en el desplazamiento con relación a la pendiente existente. Fuente: Elaboración propia.

³ Los datos del caudal de los ríos y barrancos fueron cogidos de la página web de la Conferencia Hidrográfica del Ebro (www.chebro.es).

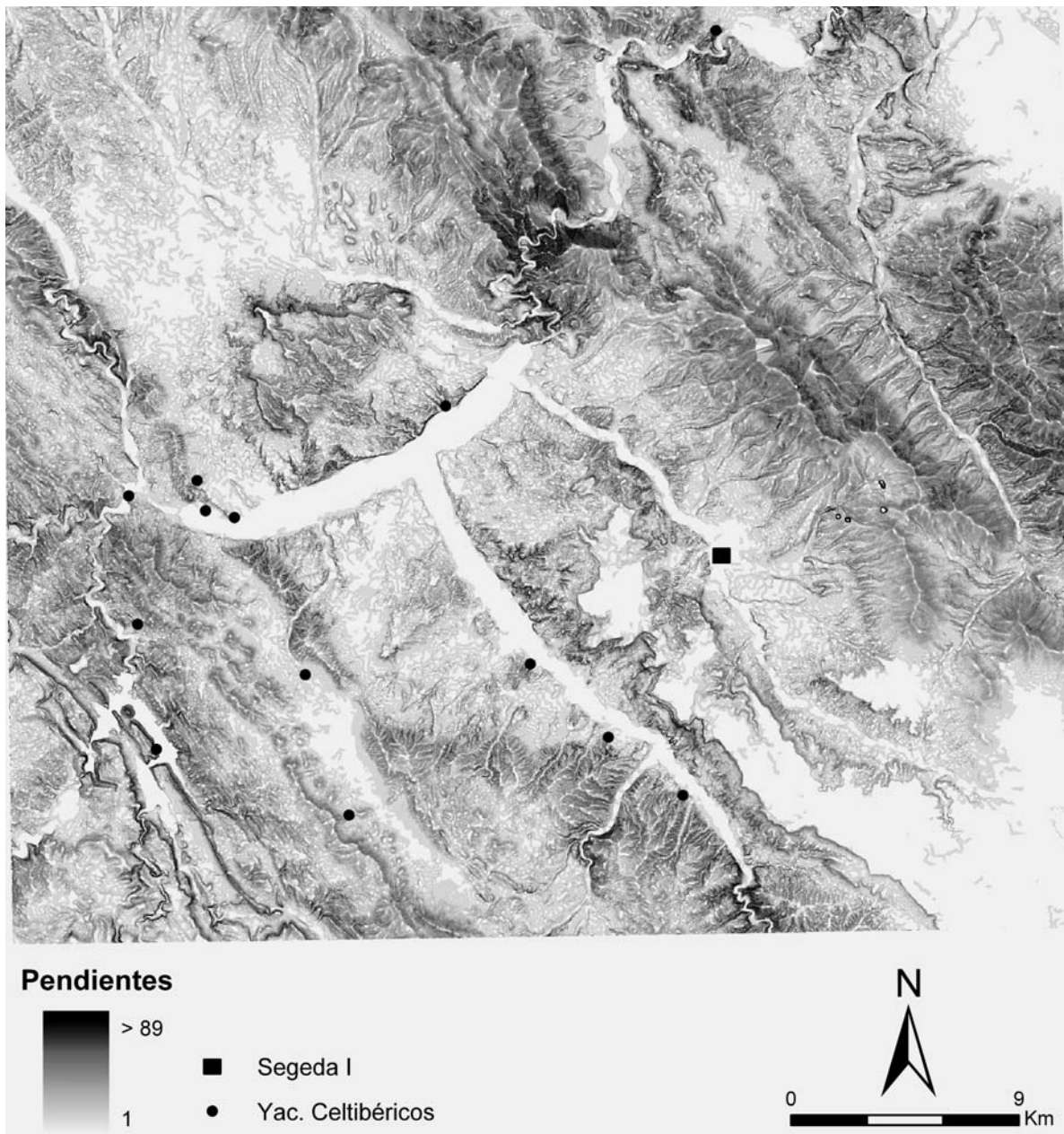


Figura 7. Capa de Coste de Pendientes obtenida tras su reclasificación Los tonos más oscuros representan los lugares con más pendiente y en blanco los lugares más llanos.

rutas con los cauces fluviales en los casos en que fueran paralelas.

Podría ocurrir, que al contrario que en este caso, los ríos más que dificultar el movimiento fuesen un factor que lo favoreciese, es decir, que se constatare su uso como red fluvial. En este caso habría que reclasificarlos como una variable favorecedora al desplazamiento, igualmente ocurrirá si se conociese la existencia de algún puente o vado.

El último criterio natural aplicado será la vegetación. Al igual que pasaba con los dos anteriores, el desplazamiento humano no será igual de consistente en una zona boscosa que en un terreno sin cultivos, por ejemplo, un individuo tardaría más tiempo en recorrer un kilómetro en la selva negra que por un pastizal. Para aplicar este criterio se utilizó la capa de usos de suelos de Corine Landcover del año 1984 a escala 1:100.000.

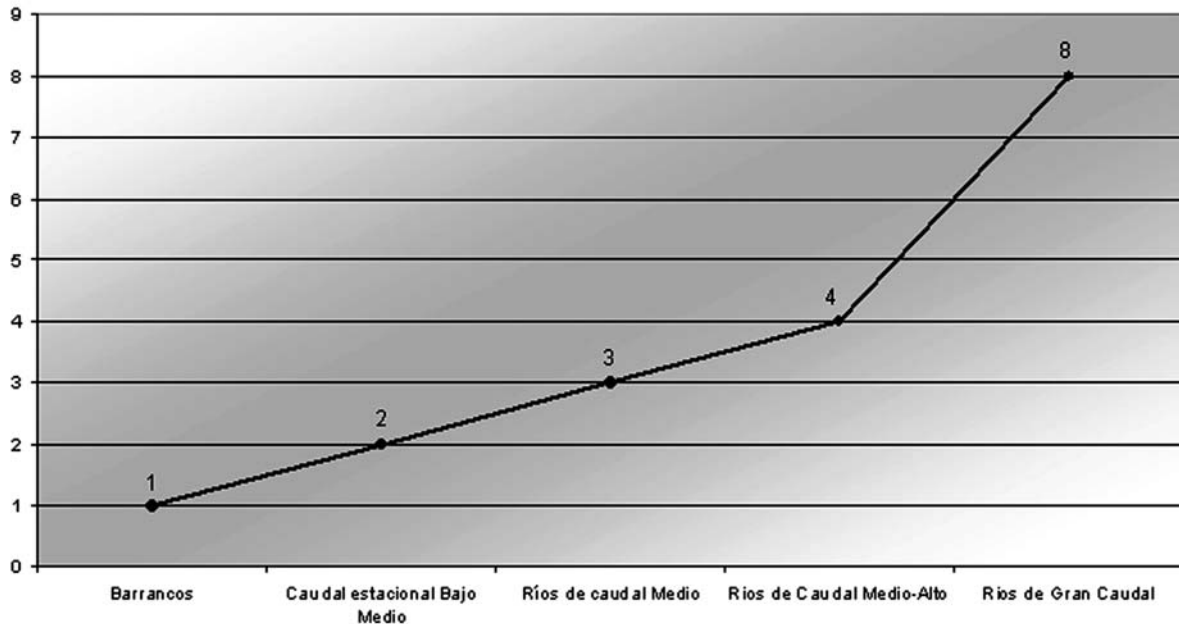
Relación Esfuerzo - Cursos de Agua

Figura 8. Valores aplicados de coste de desplazamiento según la categoría del curso de agua.

Aunque nos encontramos ante datos actuales de los cultivos, estos pueden ser indicativos de la vegetación existente en el pasado, puesto que la vegetación suele estar adaptada a unas condiciones de altura, orientación y humedad, siendo muy probable que muchas de las tierras que actualmente están en explotación no lo estuvieran en el pasado, pero por esas características orográficas y climáticas, probablemente no tuviera una densa que vegetación que dificultase el desplazamiento.

De este modo, los datos fueron reclasificados en diferentes valores según el coste energético de desplazamiento, en el cual se unen los factores de tipo o clase de vegetación existente en ese tipo de suelo con el entorno donde esta se desarrolla. Así, los bosques de coníferas se inscriben en zonas altas, húmedas y con fuertes pendientes, mientras que los cultivos agrícolas de secano se ubican en zona más llanas y accesibles, por lo que el desplazamiento por un bosque de estas características tuvo que ser más difícil que por una zona de campos de cereales (fig 9).

6. Fricción, Accesibilidad y Distancia

Una vez obtenidos los mapas de costes para cada uno de los factores utilizados (relieve, ríos y vegetación) sólo nos resta componer con ellos el mapa general de fricción. Para ello se multiplican las tres variables, obteniendo un nuevo coeficiente que es el total de Fricción del terreno a estudio (Fig. 10).

Los resultados obtenidos varían desde los valores 1 que son lo más accesibles (representados en tonos claros) hasta los valores superiores a 1000 que serán los de fricción extrema (tonos más oscuros) y por tanto poco probables que fuesen seleccionados por el ordenador durante el cálculo de las rutas óptimas.

De este modo, hemos obtenido un mapa de rugosidades, en el que se representa la mayor o menor dificultad para el desplazamiento humano. En este caso, la rugosidad la podemos considerar como un sinónimo de la fricción, representando las dos el grado de dificultad para el desplazamiento humano sobre el terreno. Asimismo, si conocemos para una zona dada el valor de esta fricción en cada punto será muy sencillo hallar cualquier índice derivado de ella,

Relación Esfuerzo - Vegetación

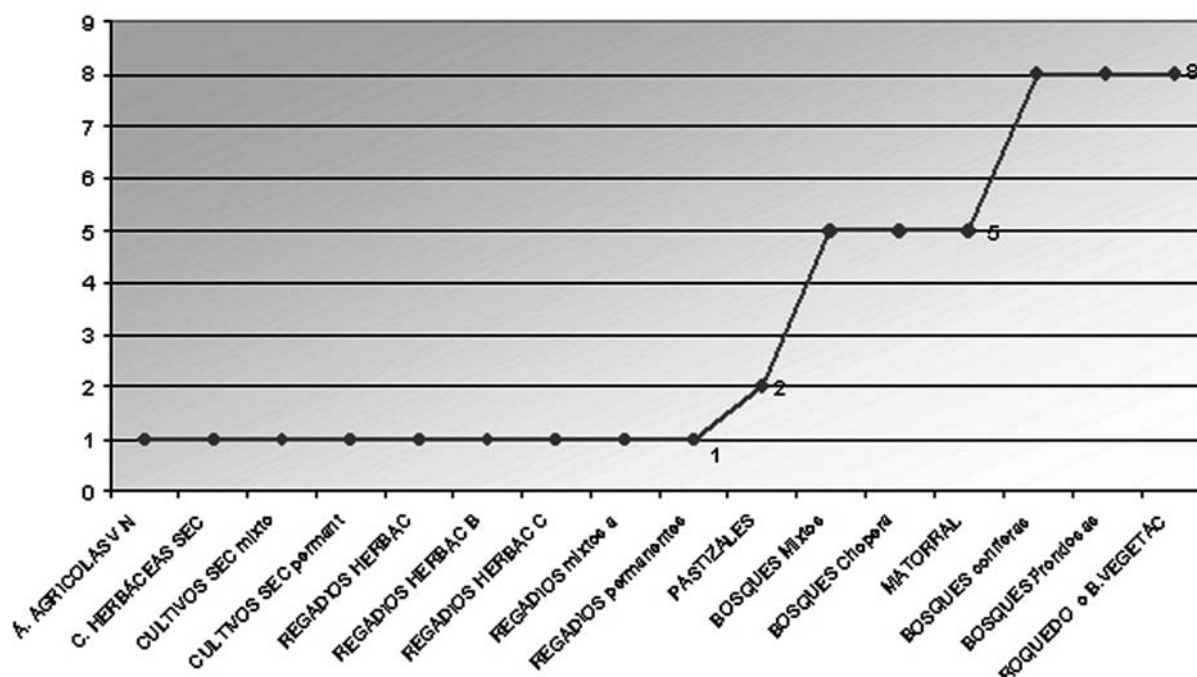


Figura 9. Valores aplicados de coste de desplazamiento según el tipo de vegetación existente.

como líneas de isócronas a partir de un punto o distancia en tiempo entre dos determinados puntos. Además de ser un cálculo sencillo es muy homogéneo, porque para todos los casos analizados sobre el mismo mapa de fricción los resultados serán equivalentes. Aunque siempre lo idóneo para estos cálculos es su comprobación empírica.

El siguiente paso será desde este mapa de fricciones valorar la accesibilidad desde un lugar determinado, en este caso el yacimiento de Segeda I, a cada uno de los restantes puntos de nuestra área de trabajo. El término Accesibilidad se refiere a un cálculo basado en dos componentes como serán la Fricción, que representa la facilidad para recorrer un terreno y la Distancia, espacio que se recorre entre dos determinados lugares. Por ejemplo en un terreno totalmente llano, sin obstáculo ni impedimento ninguno, la accesibilidad será igual a la distancia, pero sabemos que existen en el medio diferentes factores que condicionan el desplazamiento, y muchas veces zonas más lejanas son más accesible que otros más cercanas. Por ello, es importante calcular la accesibilidad a un

determinado punto, para conocer la dificultad del desplazamiento por un terreno.

Los SIG permiten el cálculo de esta accesibilidad de forma sencilla y rápida. Suelen tener módulos de trabajo denominados como COST o COST WEIGHTED que calculan la distancia entre un punto cualquiera y la totalidad de los puntos circundantes, sopesando tanto la distancia real como la fricción, por tanto muestran la facilidad de movimiento desde ese punto y hacia ese punto.

7. Ejemplo de Cálculos de Rutas Óptimas: Las rutas a Segeda

Para la realización de los cálculos de rutas óptimas de Segeda I, un primer paso sería la elaboración, a partir del mapa de fricción, de un cálculo de accesibilidad de todo el territorio a estudio a la ciudad Segeda I, o lo que es lo mismo, de los costes desde todas las celdillas del mapa a la cima de este yacimiento. Para ello se obtuvo un mapa raster de accesibilidad a este asentamiento, donde se observa como las curvas

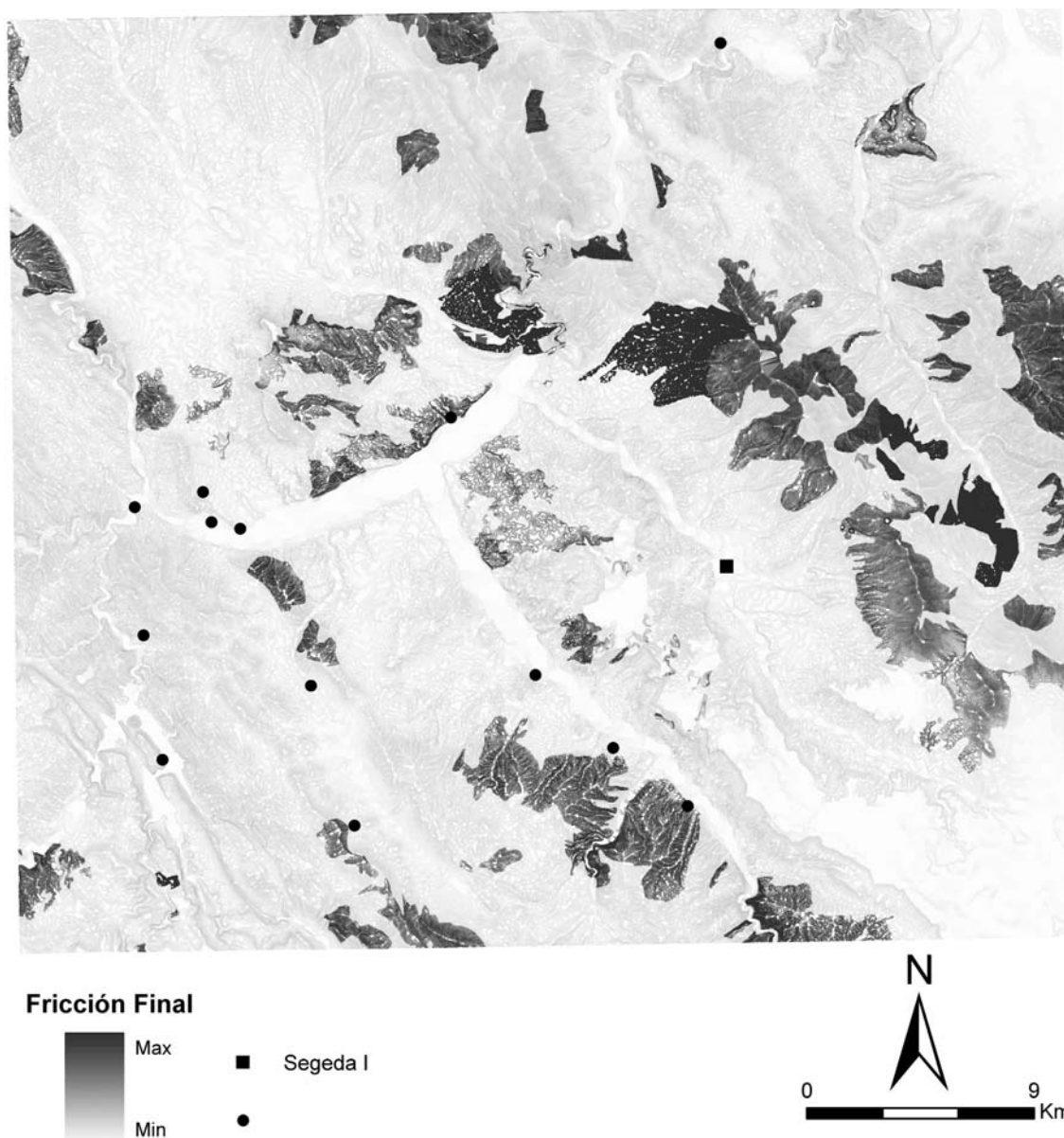


Figura 10. Capa de Fricción obtenida tras la suma de todas las variables aplicadas.

con tonalidades más anaranjadas son las más próximas a este yacimiento y como, según aumenta la distancia, va cambiando a tonalidades más oscuras y frías (colores rosas y violetas). Sin embargo, no son curvas homogéneas, sino que se han adaptando a la fricción del terreno calculada por nosotros, por ello observamos "nubes" grisáceas intercaladas, que representan zonas con muy alta fricción y por tanto escasa accesibilidad, normalmente relacionadas con zonas de mucha pendiente (Fig 11).

Sobre la resultante superficie de accesibili-

dad el programa SIG realizará sus cálculos de rutas óptimas. Para ello marcaremos dos puntos que deseemos comunicar y el ordenador en su cálculo irá sumando los valores de cada celdilla que traspase y optando por la ruta que de un valor menor. Es una operación totalmente aritmética, pero como veremos ofrece unos resultados muy sorprendentes cuando los comparemos con la realidad.

Las rutas óptimas calculadas irán siempre desde el yacimiento celtibérico de la ciudad-estado de Segeda I hasta el resto de asentamien-

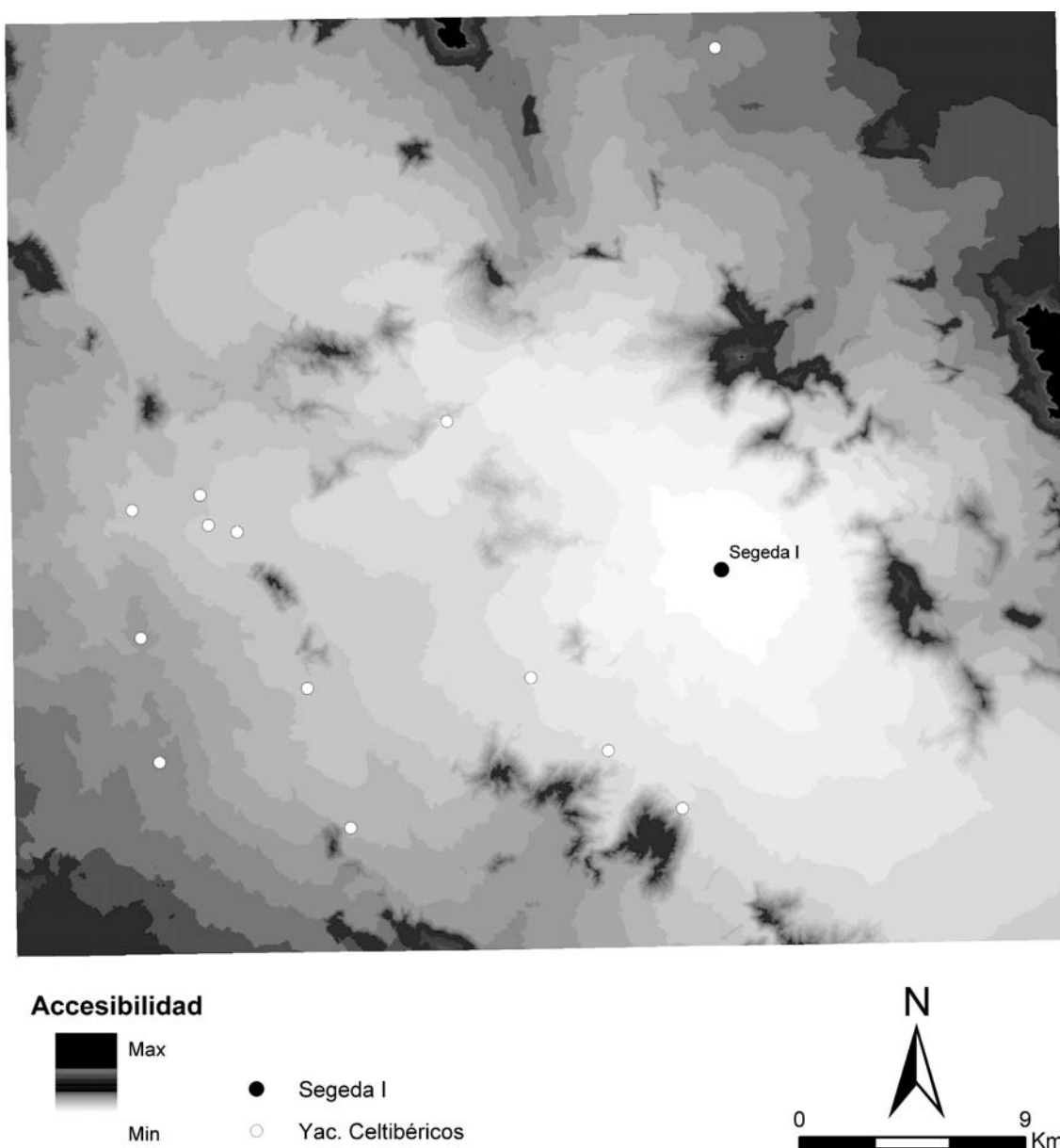


Figura 11. Capa de Accesibilidad obtenida para el yacimiento de Segeda I.

tos localizados contemporáneos a la ciudad de los Belos. En total, se han calculado trece rutas óptimas, con resultados dispares por la posición de los diferentes yacimientos (Fig. 12).

Podríamos hacer un primer grupo, donde estarían las rutas más evidentes y lógicas, como son las calculadas a los restos celtibéricos encontrados en la ciudad de Calatayud y a los yacimientos de Santa Catalina, la Caracolera y Cuesta de la Barbilla. El programa ha calculado que el acceso más económico en coste sería

siguiendo los llanos valles fluviales de los ríos Perejil y Jalón.

Luego existen otras rutas, que aunque siguen la lógica de seguir los valles fluviales, tienen la particularidad de que en algunos momentos es más económico atravesar puertos de montaña que continuar siguiendo el cauce del río. Será el caso de las rutas hacia La Cruceta o el Cabezo de Baldío. El cálculo de la última de estas rutas es un resultado muy acorde con la realidad, debido a que para cruzar a la otra vertiente de la

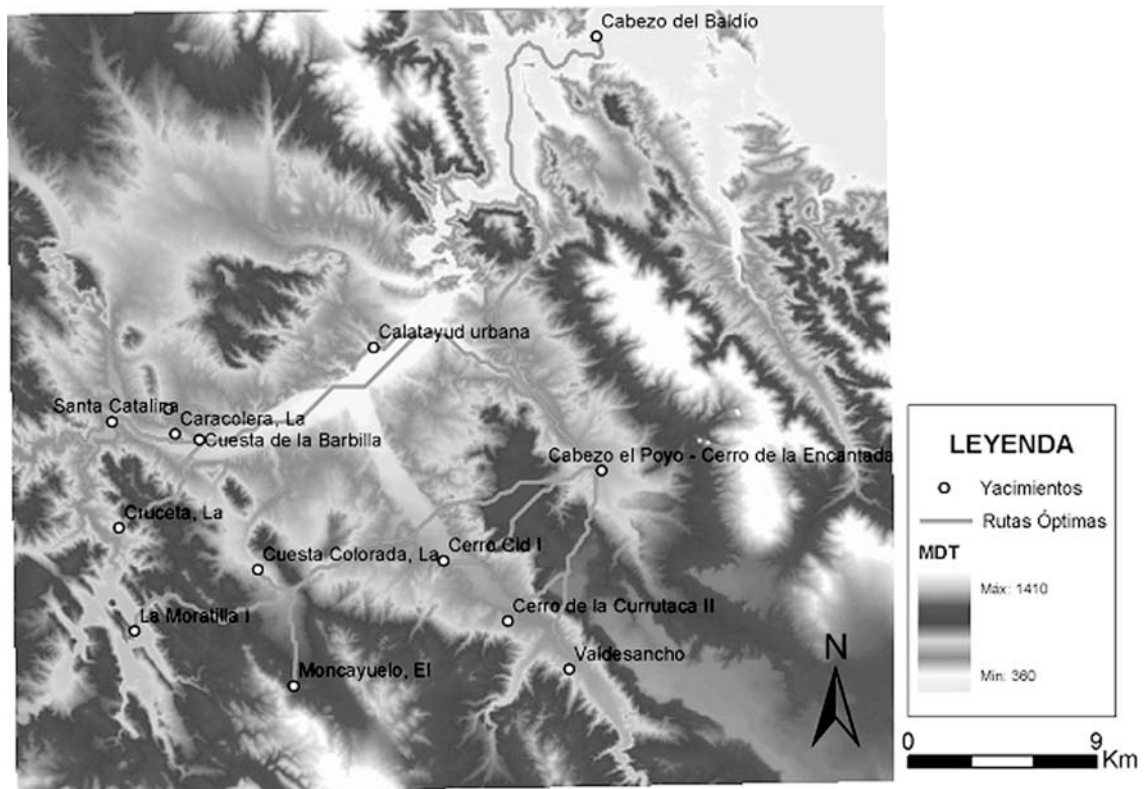


Figura 12. Rutas Óptimas obtenidas en la zona de Segeda.

sierra de Vicort el programa ha considerado menos costoso atravesar el puerto de Cavero que seguir paralelo los meandros del río Jalón. Un puerto que desde tiempos inmemoriales ha sido utilizado como zona de paso del Valle medio del Ebro al Jalón y desde allí a la meseta castellana, siendo en la actualidad zona de paso de la transitada A-II.

El último grupo se caracteriza porque no han seguido las rutas óptimas los accesibles valles fluviales, sino que el cálculo ha demostrado que atravesar los entornos montañosos del Campo Alto sería más económico que seguir los valles fluviales (caso de las rutas al Cerro Cid I, la Currutaca II, Valdesancho, la Cuesta Colorada, etc). El análisis directo de este último grupo, nos podría llevar a pensar que el cálculo de fricciones y accesibilidad sería erróneo porque para yacimientos como la Cuesta Colorada o los del Valle del Jiloca, hubiéramos considerado más factible continuar por los cauces fluviales que atravesar la sierra. Sin embargo, la comparación de las rutas obtenidas con la ortofoto 1:10.000 nos demuestra como el cálculo no irá descompasado con la realidad existente, puesto que

tradicionalmente se ha utilizado rutas similares para comunicar las poblaciones del valle del Perejiles con las del Jiloca, observándose como en algunos casos las rutas óptimas obtenidas se solapan o son muy próximas a caminos o rutas ganaderas existentes todavía en la actualidad (Fig. 13).

8. Conclusiones

La utilización de los Sistemas de Información Geográfica para el cálculo de rutas óptimas ha permitido mejorar el conocimiento cualitativo de la articulación viaria de un paisaje en periodos donde normalmente no suele existir documentación acerca de las pautas de movilidad de estas sociedades pretéritas. Aun así, debemos ser críticos con los resultados obtenidos porque mayoritariamente los factores utilizados en estos cálculos suelen provenir de datos actuales y muy generales, siendo escasas las veces en las que podemos disponer de estudios paleoambientales de un territorio. Por ello es necesario acompañar a todo este tipo de

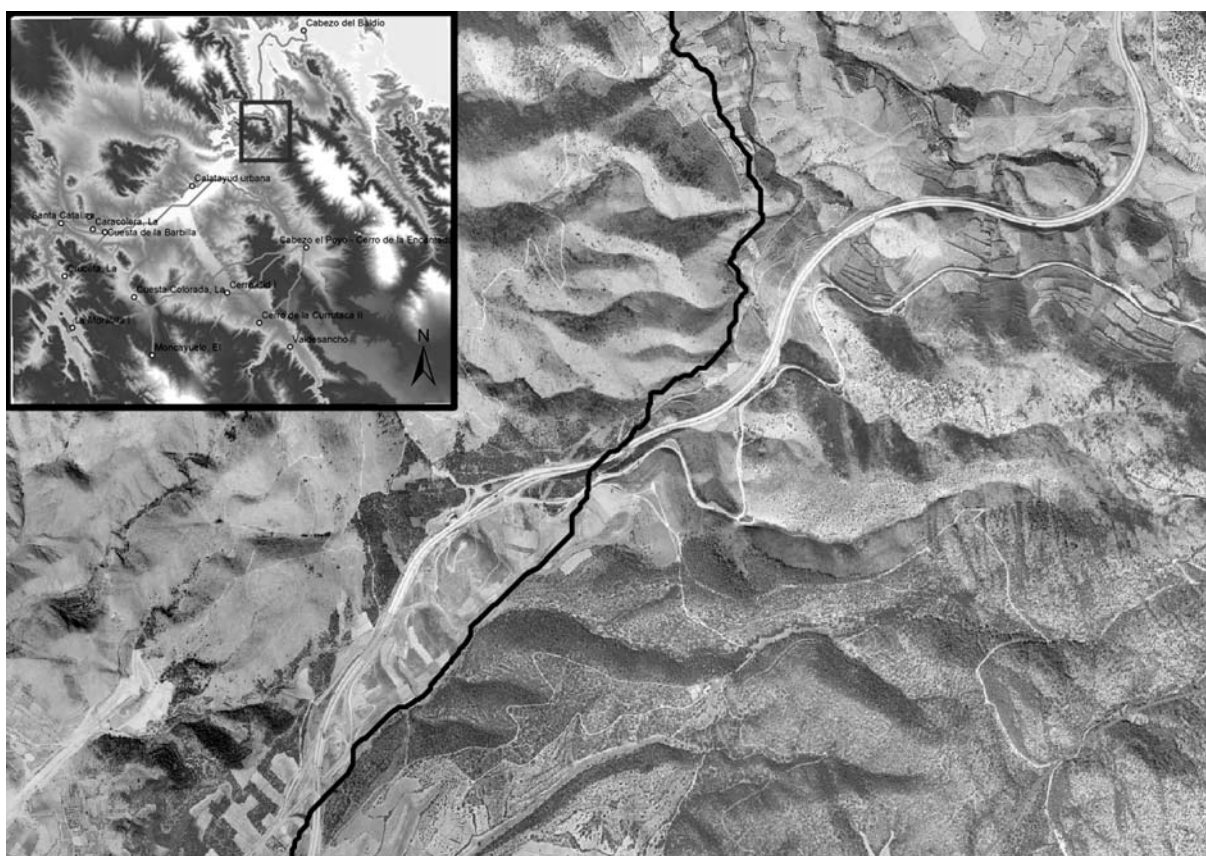


Figura 13. Detalle del paso del puerto de Cavero (Calatayud). Se observa la coincidencia con antiguas vías y próxima a la actual A-II.

análisis y cálculos de una concepción crítica y presentarlos como elementos orientativos de nuestras investigaciones.

El estudio que hemos presentado siempre ha seguido una intencionalidad demostrativa, por ello ha ido encaminado más en presentar una metodología de trabajo que unos resultados finales. Aunque realmente consideramos que algunos de ellos han sido bastante positivos, a pesar que estos cálculos sencillamente se han basado en una ecuación simple donde el esfuerzo incrementaba en relación con una serie de obstáculos como eran el relieve, el cauce de los ríos y la vegetación. En verdad, consideramos que se obtendrán nuevos y mejores resultados cuando mejoremos la escala de análisis, incluyamos nuevas variables naturales y socio-culturales y apliquemos nuevos algoritmos que permitan acercarnos con mayor precisión a las vías de movimiento del hombre prehistórico. Análisis e interpretaciones que siempre deberán

estar acompañados por comprobaciones empíricas de sus resultados.

Otra línea de evolución de este tipo de cálculos será la utilización de estas capas de fricción y accesibilidad para nuevos análisis espaciales, que nos ofrezcan nueva información sobre la actividad del hombre en el paisaje como podría ser la realización de isócronas de accesibilidad a los terrenos agrícolas o a determinados recursos como bosques, minas, ríos, etc. precisando el conocimiento de la distancia a estos recursos. Si bien, consideramos que al manejar datos actuales, la correcta aplicación de la accesibilidad deberá estar acompañada de estudios conjuntos polínicos, paleometalúrgicos, etc. para no caer en interpretaciones erróneas. Con todo, como la mayoría de estos análisis geomorfológicos todavía son excesivamente caros e inaccesibles, la utilización de datos contemporáneos nos podrá dar una orientación de la morfología del paisaje antiguo.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCÁZAR, E. M. (1998): "Un modelo de investigación histórica sobre el concejo de Jaén en la Baja Edad Media", *Arqueología Espacial 19-20, Arqueología del Paisaje*, pp. 79-90.
- ALLEN, K. M., GREEN, S., ZUBROW, E. (eds.) (1990): *Interpreting Space: GIS and Archaeology*, Taylor and Francis, Londres.
- BAENA PRESYLER, J., BLASCO BOSQUED, C., QUESADA SANZ, F. (eds.) (1999): *Los SIG y el Análisis Espacial en Arqueología*, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.
- BERMÚDEZ SÁNCHEZ, J. (2000): *La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la Arqueología*, Tesis doctoral inédita, Universidad Autónoma de Madrid.
- BERMÚDEZ SÁNCHEZ, J. (2004): "Creación de Rutinas o Macros con el Programa IDRISI: el Cálculo Acumulado de Visibilidades y Rutas Óptimas", MARTÍN DE LA CRUZ, J. C. y LUCENA MARTÍN, A. M^a. (Coord.), *Actas del I Encuentro Internacional. Informática aplicada a la investigación y la gestión arqueológicas*, Córdoba, pp. 407-418.
- BERMÚDEZ SÁNCHEZ, J. (2004): "Rutinas para el cálculo acumulado de visibilidades y rutas óptimas: algunas reflexiones sobre prospección, SIG, gestión y análisis espacial en arqueología", *Arqueología Espacial 24-25, Prospección*, Teruel.
- BLASCO, C. y BAENA PREYSLER, J. (1999): "Los S.I.G. y algunos ejemplos de su aplicación para el estudio y gestión de las cartas arqueológicas" en *Los SIG y el Análisis Espacial en Arqueología*, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.
- BLASCO, C., BAENA, J. y CARRIÓN, E. (2004): "La Recuperación del Patrimonio Arqueológico en Áreas Urbanas con la Utilización de los SIG: el caso de la Cuenca Baja del Manzanares (Madrid)", MARTÍN DE LA CRUZ, J. C. y LUCENA MARTÍN, A. M^a. (Coord.), *Actas del I Encuentro Internacional. Informática aplicada a la investigación y la gestión arqueológicas*, Córdoba, pp. 119 - 132.
- BURILLO, F. (2001): "Celtíberos y Romanos: El caso de la ciudad- estado de Segeda", en *Religión, Lengua y culturas prerromanas de Hispania*, Universidad de Salamanca, pp. 89-105.
- BURILLO, F. (2005): *Segeda. La ciudad celtibérica que cambió el calendario*. Centro de Estudios Celtibéricos de Segeda, Teruel.
- BURILLO, F., ESCOLANO, S. y RUÍZ, E. (2004): "Segeda Project. The I.T. management of the territory of a Celtiberian city-state", *Archeologia e Calcolatori*, 15, All'Insegna del Giglio, pp. 409-420, tav. VIII-IX.
- BURILLO, F. e IBÁÑEZ, E.J. (1990): *Configuración de la Base de Datos y Ficha Informatizada del Proyecto Carta Arqueológica de Aragón. Cuadernos del Instituto Aragonés de Arqueología 1*, Instituto Aragonés de Arqueología, Teruel.
- BURILLO, F., IBÁÑEZ, E.J. y POLO, C. (1993): "Ficha General de yacimientos de la Carta Arqueológica de Aragón 1: Localización y descripción física del yacimiento y su entorno", *Cuadernos del Instituto Aragonés de Arqueología*, II, Teruel.
- CABRAL RODRÍGUEZ, V.M. (2004): "El Sistema de Información Geográfico de la Barcelona Arqueológica (SIGBARQ), modelo conceptual de Datos." en MARTÍN DE LA CRUZ, J. C. y LUCENA MARTÍN, A. M^a. (Coord.), *Actas del I Encuentro Internacional. Informática aplicada a la investigación y la gestión arqueológicas*, Córdoba, pp. 239 - 253.
- DEMERS, M. N. (1996): *Fundamentals of geographical information systems*, John Wiley and Sons, Chichester.
- ERICSON, J. AND GOLDSTEIN, R. (1980): "Work space: a new approach to the analysis of energy expenditure within site catchments" en *Catchment Analysis: Essays on Prehistoric Resource Space*, ed. por FINDLOW, F. J. and ERICSON, J.E., Anthropology UCLA, Los Angeles, pp. 21 - 30.
- FAIRÉN JIMÉNEZ, S. (2004): "¿Se hace camino al andar? Influencia de las variables medioambientales y culturales en el cálculo de caminos óptimos mediante SIG", *Trabajos de Prehistoria* 61, nº 2, pp. 25-40
- FERNÁNDEZ CACHO, S. (2002): "ARQUEOS. The Information System of the Andalusian Archaeological Heritage" en *Mapping the future of the past* ed. GARCÍA SANJUÁN, L. y WHEATLEY, D.W., Universidad de Sevilla, Sevilla, pp. 27-36.
- FERNÁNDEZ CACHO, S. (2004): "Nuevas Tecnologías en la Gestión de la Información de Patrimonio Arqueológico en Andalucía. Problemas Detectados y Soluciones Adoptadas", MARTÍN

- DE LA CRUZ, J. C. y LUCENA MARTÍN, A. M^a. (Coord.), *Actas del I Encuentro Internacional. Informática aplicada a la investigación y la gestión arqueológicas*, Córdoba, pp. 169-210.
- GÁLVEZ, M. S. y ACERO, J. (2004): "Una aplicación de SIG en Arqueología: Ermitas y Poblamiento en la Campiña Sur Extremeña", en MARTÍN DE LA CRUZ, J. C. y LUCENA MARTÍN, A. M^a. (Coord.), *Actas del I Encuentro Internacional. Informática aplicada a la investigación y la gestión arqueológicas*, Córdoba, pp. 265 - 276.
- GILLINGS, M., MATTINGLY, D. y DALEN, J.V. (1999): "Geographical Information Systems and Landscape Archaeology", en *The Archaeology of Mediterranean Landscapes*, 3, Oxbow Books, Oxford.
- GORENFLO, L.J. y GALE, N. (1990): "Mapping regional settlement in information space". *Journal of Anthropological Archaeology*, 9: 240-274.
- GRAU MIRA, I. (2002): *La organización del Territorio en el área central de la Contestania Ibérica*, Serie Arqueología, Universidad de Alicante, Alicante.
- IGNACIO FIZ (2001-2002): "Usos de un SIG, Sistema de Información Geográfico, en la construcción de una planimetría arqueológica para Tarragona", en *Revista d'Arqueologia de Ponent*, 11-12, Lerida.
- KUNA, M. (2002): "The Archaeological Record of Bohemia. An Attempt at an Analytical Information System" en ed. GARCÍA SANJUÁN, L. y WHEATLEY, D.W., *Mapping the future of the past*, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2002.
- LLOBERA, M. (1999): "Understanding movement: a pilot model towards the sociology of movement" en *Beyond the map: archaeology and spatial technologies*, LOCK, G.R. (ed), Amsterdam: IOS, pp. 65-84.
- LLOBERA, M. (2000): "Understanding movement: a pilot model towards the sociology of movement". En G. LOCK (ed.): *Beyond the map: archaeology and spatial technologies*: 65-84. Amsterdam, IOS Press.
- LOCK, G. y STANCIC, Z. (1995): *Archaeology and Geographical Information Systems: A European Perspective*, Taylor & Francis, Londres/Nueva York.
- MARTINS, M y DANTAS, C. (2001): "O projecto SIABRA: um Sistema de Informação para a arqueologia urbana de Braga", en *SIG's aplicados à Arqueologia da Península Ibérica*, 3º Congreso de Arqueología Peninsular, Porto, pp. 43 -62.
- MAYER, M. (2002): "Some Aspects of SMR Management in Austria" en *Mapping the future of the past* ed. GARCÍA SANJUÁN, L. y WHEATLEY, D.W., Universidad de Sevilla, Sevilla, 2002.
- NAVARRO, C. y ORTIZ, R. (2004): "Aplicaciones Informáticas en el ámbito de la Gestión del Patrimonio Histórico: el Caso de Montilla (Córdoba)", MARTÍN DE LA CRUZ, J. C. y LUCENA MARTÍN, A. M^a. (Coord.), *Actas del I Encuentro Internacional. Informática aplicada a la investigación y la gestión arqueológicas*, Córdoba, pp. 103 - 118.
- ROLDÁN, L., BAENA, J., BLASCO, C., BERMÚDEZ, J. y GARCÍA ORTIZ, E. (1999): "SIG y Arqueología romana. Restitución del trazado del acueducto de Cádiz" en BAENA, J., BLASCO, C. Y QUESADA, F., *Los SIG y el análisis espacial en Arqueología*, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, pp. 255-272.
- WHEATLEY, D. y GILLING M. (2002): *Spatial Technology and archaeology. The Archaeological Applications of GIS*, Taylor & Francis, New York.