

Francisco J. Goerlich Gisbert  
Isidro Cantarino Martí

# Un índice de rugosidad del terreno a escala municipal a partir de *modelos de elevación digital* de acceso público

# Un índice de rugosidad del terreno a escala municipal a partir de *modelos de elevación digital de acceso público*

Francisco J. Goerlich Gisbert<sup>1,2</sup>  
Isidro Cantarino Martí<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UNIVERSIDAD DE VALENCIA

<sup>2</sup> INSTITUTO VALENCIANO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS (Ivie)

<sup>3</sup> UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

## ■ Resumen

Este documento de trabajo examina una característica de nuestra geografía que no parece haber recibido ninguna atención por parte de los estudios de geografía en nuestro país, la rugosidad del terreno. Utilizando *sistemas de información geográfica* y dos *modelos de elevación digital de acceso público* construimos un índice de rugosidad basado en la pendiente de las celdas vecinas. Descartado uno de los modelos, examinamos la rugosidad en relación a la altitud y encontramos que ambas presentan muy poca correlación. La rugosidad es por tanto una característica diferente de la altitud y con una distribución espacial sustancialmente distinta. La conclusión básica es que el índice de rugosidad calculado resume una característica útil del paisaje, como lo es la altitud, la longitud o la proximidad a la costa. Además, la disponibilidad del modelo digital del terreno de rugosidades permite el cálculo de valores promedio para el índice a cualquier nivel de agregación geográfica que se desee, como provincias o municipios.

## ■ Palabras clave

Modelo de elevación digital, índice de rugosidad del terreno, altitud, GTOPO30, SRTM.

## ■ Abstract

This working paper looks at a geographical feature that, to our knowledge, has not been investigated in Spain so far, terrain ruggedness. Using *geographical information systems* and two public access *digital elevation models* we construct a terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity, and is based on the slope with neighborhood cells. Focusing on the higher resolution Digital Elevation Model, we show that ruggedness and altitude are almost completely unrelated and both variables have a very different spatial distribution. The main conclusion is that the ruggedness index provides a summary of a useful geographical feature of the landscape, in the same way as altitude or proximity to the coast. In addition, the Digital Terrain Model of ruggedness can be used to obtain average values of ruggedness at any level of geographical aggregation we desire, such as regions or municipalities.

## ■ Key words

Digital Elevation Model, ruggedness index, altitude, GTOPO30, SRTM.

Al publicar el presente documento de trabajo, la Fundación BBVA no asume responsabilidad alguna sobre su contenido ni sobre la inclusión en el mismo de documentos o información complementaria facilitada por los autores.

*The BBVA Foundation's decision to publish this working paper does not imply any responsibility for its content, or for the inclusion therein of any supplementary documents or information facilitated by the authors.*

La serie Documentos de Trabajo tiene como objetivo la rápida difusión de los resultados del trabajo de investigación entre los especialistas de esa área, para promover así el intercambio de ideas y el debate académico. Cualquier comentario sobre sus contenidos será bien recibido y debe hacerse llegar directamente a los autores, cuyos datos de contacto aparecen en la *Nota sobre los autores*.

*The Working Papers series is intended to disseminate research findings rapidly among specialists in the field concerned, in order to encourage the exchange of ideas and academic debate. Comments on this paper would be welcome and should be sent direct to the authors at the addresses provided in the About the authors section.*

La serie Documentos de Trabajo, así como información sobre otras publicaciones de la Fundación BBVA, pueden consultarse en:  
**<http://www.fbbva.es>**

*The Working Papers series, as well as information on other BBVA Foundation publications, can be found at: <http://www.fbbva.es>*

Versión: julio 2010  
© Francisco J. Goerlich Gisbert e Isidro Cantarino Martí, 2010  
© de esta edición / *of this edition*: Fundación BBVA, 2010

EDITA / PUBLISHED BY  
Fundación BBVA, 2010  
Plaza de San Nicolás, 4. 48005 Bilbao

## 1. Introducción

EL objetivo último de este trabajo es presentar un índice de rugosidad del terreno a escala municipal y para todo el territorio español. Este índice pretende ser un indicador de la morfología del terreno a pequeña escala, sin necesidad de estar relacionado necesariamente con la altitud. De esta forma, pretende diferenciar claramente las zonas altas en planicies de las zonas de baja altitud pero montañosas, ya que no necesariamente los terrenos más elevados tienen por qué coincidir con los más rugosos, como tendremos ocasión de comprobar.

La obtención del índice de rugosidad del terreno servirá para otros propósitos de interés en sí mismos. En primer lugar, el trabajo nos permitirá explorar el concepto de *rugosidad*, un atributo del terreno que no parece que haya recibido demasiada atención hasta el momento presente, al menos en un contexto general. En segundo lugar, el índice permitirá una primera aproximación a la comparación de dos modelos de elevación digital (*DEM*) de ámbito global y acceso público de amplio uso. Ello nos permitirá determinar, de forma colateral, que modelo es más preciso para el ámbito territorial español, o al menos cual es menos exacto para determinadas partes del territorio. En tercer lugar, una vez calculado el índice a partir del *DEM* seleccionado, examinaremos la *rugosidad* de nuestra geografía como un aspecto diferenciado de la altitud. Una cuestión de interés en sí misma desde el punto de vista de la geografía.

España es un país con una altitud media considerable –por encima de los 600 m– sobre todo si tenemos en cuenta su longitud de costa –casi 8.000 km, de los cuales casi 5.000 km corresponden a la península–. Con frecuencia se dice también que es un país montañoso, pero salvo por sus altitudes máximas –los 3.715 m del Teide, en Tenerife, o los 3.479 m del Mulhacén (Sierra Nevada), en Granada, que es la altitud máxima de la península– o por la longitud de sus sistemas montañosos –de nuevo casi 5.000 km para la península–, no disponemos de estadísticas que traten de resumir en forma cuantitativa esta característica de la

morfología de nuestra geografía a diversos ámbitos territoriales<sup>1</sup>. El presente trabajo pretende ser una contribución en esta dirección.

El trabajo forma parte de un proyecto más amplio cuyo objetivo último es el estudio de los efectos de la geografía sobre la localización de la población y la actividad económica. Existe un consenso generalizado de que la geografía tiene importantes consecuencias para los resultados económicos (Dobado 2004), tanto desde el punto de vista de la localización de la actividad, como de los flujos de comercio que tienen lugar entre los distintos centros de producción y consumo. El debate se centra fundamentalmente en los diferentes canales potenciales de causalidad. Mientras algunos autores ven el estado del desarrollo actual entre países como fundamentalmente determinado por cuestiones geográficas (Gallup y Sachs 2001, Sachs 2001; Sachs and Warner 2001, Sachs y Malaney 2002), otros autores enfatizan canales indirectos, según los cuales los condicionantes geográficos interactúan de diversas formas con factores institucionales e históricos hasta conformar el nivel de desarrollo actual (Sokoloff y Engerman 2000; Acemoglu, Johnson y Robinson 2001, 2002; Engerman y Sokoloff 2002). En ambos casos la geografía juega un papel fundamental en la distribución espacial de la actividad y la riqueza, ya sea de forma directa (Mellinger, Sachs y Gallup 2000;

---

<sup>1</sup> La información sobre estas características físicas de nuestro territorio procede del Instituto Nacional de Estadística (INE, <http://www.ine.es>) dentro de la sección de Territorio (consultada el 7/10/2009); excepto por la altitud media, que se obtiene a partir de la base de datos municipal del Instituto Geográfico Nacional (IGN, <http://www.ign.es>) y que se calcula como el promedio simple de las altitudes de las capitales de cada municipio a fecha del censo de 2001, se trata por tanto de la altitud media a la que vive la población, y que resulta ser de 615 m. La altitud media del territorio es bastante superior, de hecho información sobre zonas altimétricas disponible en el INE anteriormente (en 2002), pero no en la actualidad, indica que un 18,5% de la superficie de nuestro país se sitúa por encima de los 1.000 m de altitud, y la superficie por encima de los 600 m es del 57,7%. Uno de los modelos de elevación digital que utilizamos a continuación, el *SRTM*, arrojó un valor para la altitud media del territorio de 685 m.

Resulta interesante constatar como la longitud de los sistemas montañosos peninsulares, 4.885 km, es prácticamente igual a la longitud de costa para el mismo ámbito territorial, 4.865 km. De esta forma podríamos decir que España es tanto un país costero, como un país montañoso, aunque su grado de *montañosidad* no parece haberse medido de forma cuantitativa.

Una excepción es, no obstante, la base de datos de Gerrard (2000) que, a partir de una combinación de altitud, desnivel y área, define a España con un grado de *montañosidad* del 21,6%. Lo que en su metodología quiere decir que nuestro país dispone de un 21,6% de territorio montañoso, un valor similar al de Italia, 22,2%, o Grecia, 21,8%; pero muy por encima del de Francia, 10,5%, o Portugal, 5,8%.

Rappaport y Sachs 2003) o de una forma más indirecta a través de las primeras y segundas ventajas naturales de Fujita, Krugman y Venables (1999).

En el contexto de la literatura del comercio se ha puesto énfasis desde siempre en la importancia de los costes de transporte y las distancias entre origen y destino como factores que afectan a los flujos comerciales. A pesar del convencimiento generalizado de que la distancia si importa, numerosas paradojas sobre la relevancia de los efectos frontera (McCallum 1995; Anderson y Smith 1999; Anderson y van Wincoop 2003), o sobre cómo medir distancias (Head y Mayer 2002, Marcon y Puech 2003) y costes (McCann 2005, Combes y Laffourcade 2005), en relación a los métodos de transporte utilizados, todavía subsisten. De hecho no se han realizado muchos progresos en la modelización de los costes impuestos por la distancia desde la especificación de los *costes iceberg* de Samuelson (1952), hace ya más de medio siglo.

También la literatura del conflicto armado ha explorado sistemáticamente los efectos de la geografía y la orografía del terreno sobre las guerras y la determinación de las fronteras (Collier y Hoeffler 2004; Buhaug 2005).

Desde el punto de vista práctico, la medición de los efectos de la geografía sobre los resultados económicos ha descansado sobre variables relativamente toscas y agregadas. Distancias simples (y lineales) entre puntos, distancias respecto a la costa, al ecuador o a los trópicos, altitudes medias, cantidad de lluvia, insolación promedio en determinadas áreas, o códigos climáticos, por poner algunos ejemplos. En general el análisis se ha mantenido en una escala relativamente elevada, a nivel de país o como mucho a nivel regional (Dobado 2004, para el caso de español); salvo en los casos de estudios sobre la localización histórica de industrias particulares (Nadal 2003), donde el análisis se ha mantenido a nivel mucho más descriptivo.

A pequeña escala tan sólo se dispone, para nuestro país, de trabajos que muestran los patrones de localización de la población en relación a determinados factores geográficos, básicamente la altitud y la proximidad a la costa, o factores de tipo político-administrativos, la capitalidad de provincia (Reher 1986, 1994; Pons, López y Montoro 2004; Goerlich y Mas 2008a, 2008b, 2009), pero todos ellos carecen de un análisis causal del tipo enfatizado por Krugman (1991).

La razón es simple, «medir la geografía a pequeña escala» es difícil. Sin embargo, Burchfield, Overman, Puga y Turner (2006) han mostrado como los nuevos métodos de cartografía digital y teledetección permiten ampliar la escala de análisis a un nivel impensable hasta hace pocos años. ¡En las imágenes públicas del *Landsat 7* (Circa 2000)<sup>2</sup> la resolución de un *pixel* es de 14,25 m! Overman (2009) ofrece argumentos convincentes, y numerosos ejemplos, sobre las posibilidades de estas nuevas fuentes de información para el análisis espacial de los fenómenos económicos.

El trabajo se estructura de la siguiente forma. El apartado siguiente se dedica a una descripción de las fuentes de información y los programas utilizados, a continuación se examinan las cuestiones metodológicas relacionadas con el concepto y cálculo de la rugosidad del terreno en la práctica. Una vez tomadas ciertas decisiones metodológicas y elaborados los índices de rugosidad se realiza un análisis de esta característica, utilizando también el ámbito provincial y municipal. Ello nos permite hacer una reflexión sobre los resultados obtenidos a partir de los dos *DEM* utilizados. Finalmente se ofrecen unas conclusiones.

## 2. Material y métodos

LA construcción del índice de rugosidad parte de un *modelo de elevación digital (DEM)*. Un *DEM* es esencialmente una matriz de datos georeferenciada en la que en cada celda se hace constar el dato de altitud (en un determinado sistema geodésico) y que va referido al centro de dicha celda.

En la actualidad existen dos modelos de altitud del terreno de carácter global y acceso público:

1. Modelo *GTOPO30*, desarrollado por el U.S. *Geological Survey* (1996) y con un paso de malla de 30 segundos de arco (1 km de resolución aproximada-

---

<sup>2</sup> <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat7.html>.

mente)<sup>3</sup>. La precisión vertical es de unos 30 metros, al 90% de nivel de confianza.

2. Modelo *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)*, desarrollado por la *NASA (National Aeronautics and Space Administration, 2000, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>)* mediante técnicas de radar (teledetección). Ofrece actualmente una resolución planimétrica de 3 segundos de arco (90 m aproximadamente) y una precisión altimétrica de 4-6 metros para España<sup>4</sup>.

Antes de decidirse sobre la utilización de uno u otro hemos experimentado con ambos, lo que, dada su diferente precisión planimétrica nos permite examinar la sensibilidad de los resultados y comprobar, indirectamente, la exactitud de los datos para nuestro país.

Dado un *DEM*, el primer paso consiste en la transformación del mismo en un *modelo digital del terreno (DTM)* de rugosidades para España por medio de los métodos que se describen en el apartado siguiente, dedicado a cuestiones metodológicas. Un *DTM* tiene la misma estructura que un *DEM*; pero, en lugar de altitudes, los valores de cada celda contienen otra información susceptible de ser georeferenciada, en nuestro caso rugosidades, pero podría tratarse de población (como en el caso de *LandScan* del *Oak Ridge National Laboratory, <http://www.ornl.gov/sci/landscan/>), CO<sub>2</sub> (contaminación), tipo de vegetación, usos del suelo (como en la aplicación *Corine Land Cover* de la *European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>), insolación o cantidad de lluvia acumulada durante un determinado periodo de tiempo (como por ejemplo el *Atlas Climático Digital de la Península Ibérica, <http://www.opengis.uab.es/wms/iberia/>)*. Se trata pues de una muestra de datos (continuos o discretos) recogidos sobre un espacio físico continuo y convenientemente ordenados desde un punto de vista espacial.**

---

<sup>3</sup> Exactamente la resolución es de ½ milla náutica en el ecuador.

<sup>4</sup> Se espera, sin embargo, que su resolución se vea aumentada en un breve plazo por un factor de 3, es decir hasta 1 segundo de arco (30 m aproximadamente). Esta es la precisión de un nuevo modelo de altitud del terreno que ha comenzado recientemente a distribuirse, el *ASTER GDEM (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>)* y que no hemos utilizado.

Dicho *DTM* tiene la misma resolución que el *DEM* de partida y a partir de él se puede trabajar al nivel de agregación geográfica que se desee. Nuestra aplicación utiliza los polígonos municipales (8.108) del censo de 2001 para calcular, como promedio simple de las celdas del *DTM*, el índice de rugosidad a escala municipal. Como subproducto se ofrece también la altitud promedio de cada término municipal, un dato que no nos consta que esté disponible públicamente, ya que la altitud proporcionada por la base de datos municipal del Instituto Geográfico Nacional (*IGN*, <http://www.ign.es>) hace referencia a la altitud de la capital del municipio.

Las herramientas informáticas utilizadas se basan en *sistemas de información geográfica (GIS)*. En concreto, tanto para el manejo de los archivos de elevaciones del terreno, de tipo *raster*, como para los de polígonos, de tipo vectorial, se ha empleado el ArcGIS, con sus tres niveles de funcionalidad (y diferentes licencias): ArcView, ArcEditor y ArcInfo. Se trata de un programa de *GIS* desarrollado por *ESRI (Environmental Systems Research Institute)*, <http://www.esri.com>, y que se ha situado como un estándar en la gestión y análisis de este tipo de archivos. Gran parte del trabajo realizado ha utilizado la herramienta *Spatial Analyst*.

Para algunos cálculos ha sido necesario emplear una herramienta más potente, capaz de hacer funcionar rutinas generalizadas en formato *AML (Arc Macro Language)*. En concreto se ha utilizado el ArcInfo WorkStation, con ejecución en ventana de comandos.

## 2.1. Procesado previo de los datos

Los datos del modelo *GTOPO30* se obtuvieron directamente de su *URL*: <http://eros.usgs.gov/>. El ámbito territorial español se inscribe íntegro en dos archivos comprimidos (extensión \*.gz) de 16 y 9 Mb de tamaño. Estos archivos se pueden abrir directamente en ArcGIS.

Los datos del modelo *SRTM* se obtuvieron de su *URL*: <http://srtm.csi.cgiar.org/>. En este caso son precisos 8 archivos de unos 30 Mb cada uno comprimidos (extensión \*.zip). Su extracción da lugar a archivos de 180 Mb, en formato ASCII, y acompañados de un archivo de proyección (\*.prj). Se trata de un formato estándar para los *DEM*, y que también se abren directamente en ArcGIS.

Los polígonos municipales proceden del Instituto Nacional de Estadística (INE, <http://www.ine.es>) en formato vectorial *shape* de ESRI<sup>5</sup>.

Los datos originales hay que adecuarlos al ámbito territorial español. Para evitar que el *DEM* acabe bruscamente en los límites territoriales marcados, falseando los valores de cálculo en estas zonas, se utilizó la herramienta *Buffer* de *Analysis Tools* ampliando los límites territoriales en 500 m en las zonas costeras y 800 m para las fronteras montañosas, como el Pirineo. Una vez delimitado este perímetro se extraen los datos *raster* del territorio español mediante la herramienta *Extraction/Extract by Mask* que ofrece *Spatial Analyst*. El fichero resultante es ya del formato propio empleado por ArcGIS para datos *raster*, y podemos empezar a trabajar con él.

Sin embargo, antes de comenzar los cálculos es necesario realizar una operación previa que consiste en una nueva proyección de los datos. Los modelos de elevaciones utilizan una proyección geográfica con *datum* WGS84. En la práctica ello significa que las celdas son cuadradas sólo en la zona del ecuador, dado que el arco en el paralelo va disminuyendo con la latitud, pero el arco en el meridiano es constante. Así pues, dada la localización geográfica de España las celdas son rectangulares. Por tanto, para realizar medidas de pendientes, es preciso recurrir a una proyección de igual área que ofrezca celdas cuadradas con un tamaño dado.

Teniendo en cuenta que el tamaño de celda original es de 925 × 925 metros para *GTOPO30* y 92.5×92.5 metros para *SRTM*, y el tamaño a la latitud del paralelo 40° es de 712 × 925 metros para *GTOPO30* y 71,2 × 92,5 metros para *SRTM*, se ha establecido un tamaño estándar de 800 × 800 metros para *GTOPO30* y de 80 × 80 metros para *SRTM*. De este modo, se mantiene la densidad de datos, pero con celdas ya cuadradas<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Los polígonos originales no se correspondían a un registro por término municipal, de forma que fueron agregados con la herramienta *Dissolve* de *Data Management Tools*. Igualmente fueron eliminados del análisis los territorios históricos, por carecer de código de término municipal en el INE, no obstante estos territorios fueron mantenidos en el análisis provincial que se realiza más adelante.

<sup>6</sup> Este proceso de re-proyección se realizó dentro de ArcGIS con *Data Management/Projections and Transformations/Raster/Project Raster* utilizando *Resampling technique = NEAREST*.

De esta manera es posible unir los diferentes ficheros *raster* para formar el ámbito territorial que interese mediante la herramienta *Data Management Tools/Raster/Mosaic to New Raster*. Esta herramienta también permite reproyectar y asignar un tamaño de celda estándar.

Finalmente, es preciso depurar los datos para eliminar algunos códigos que se asignan a las celdas y que pueden provocar cálculos erróneos. Así, por ejemplo, el *GTOPO30* asigna el valor “55537” a las celdas que son ocupadas por mares y océanos. También, el modelo *SRTM* asigna “No Data” a zonas continentales próximas a la costa. En este caso, cambiamos estos valores por “0”, dejando inalterados el resto de valores<sup>7</sup>.

Finalizadas todas estas operaciones previas, disponemos de ficheros listos para trabajar.

### 3. Rugosidad del terreno: concepto y medición. Una digresión

#### *rugosidad*

1. ‘Cualidad de rugoso.’
2. ‘Arruga.’

#### *arruga*

2. ‘Pliegue deforme o irregular que se hace en la ropa o en cualquier tela o cosa flexible.’

*Diccionario de la Real Academia Española, 2001*

LA rugosidad del terreno puede ser definida de forma genérica como una característica relacionada con la irregularidad o accidentalidad del territorio. Sin embargo, una cuantificación de esta propiedad es, por su propia naturaleza, de difícil implementación. Para biólogos y naturalistas la medición de la rugosidad del terreno se ha convertido en una variable clave que ayuda a explicar los hábitats utilizados por especies animales terrestres (Gionfriddo y Krausman 1986; Wiggers y Beasom 1986) o aspectos relacionados con la diversidad vegetal (Crawford 2008). No obstante, esta característica del terreno también ha recibido cierta atención en geología (Hobson 1972) y en determinadas aplicaciones de ingeniería (Polidori, Chorowicz y Guillande 1991, Aguilar, Aguilar, Agüera, Carvajal y Sánchez 2002).

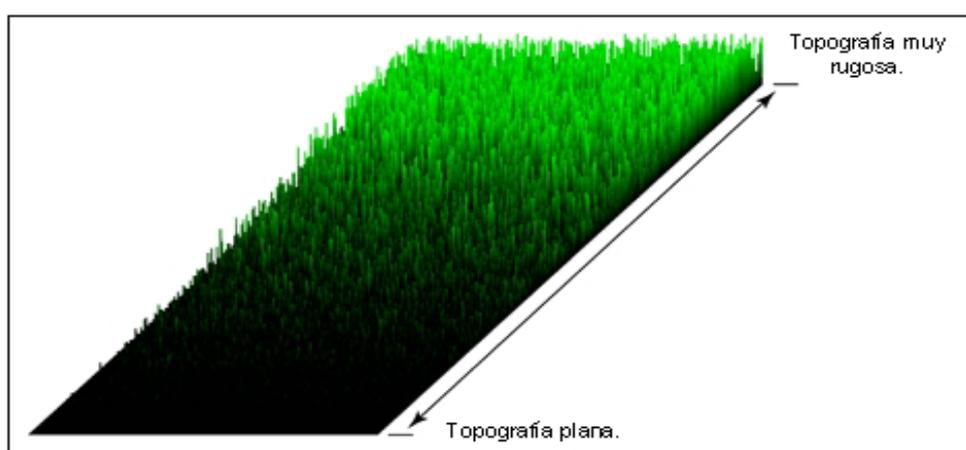
---

<sup>7</sup> Esta operación se realiza con la herramienta *Conditional* de *Spatial Analyst*.

Este apartado realiza un breve repaso por la literatura, explora como diversos autores han hecho operativa la idea genérica de rugosidad, examina con detalle el índice de rugosidad del terreno que hemos calculado y ofrece unas reflexiones sobre algunas de las propiedades que deberían cumplir este tipo de índices.

Una impresión cualitativa de la rugosidad puede ser examinada de forma visual en la figura 1.

FIGURA 1: Aspecto visual de la rugosidad del terreno



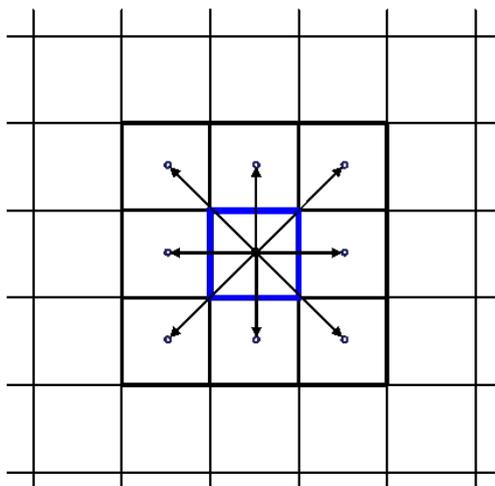
En el campo del estudio de los hábitats de especies animales, el primer indicador de rugosidad del terreno se debe a Beasom, Wiggers y Giordano (1983), y se basa en el supuesto de que la rugosidad es función de la longitud total de las curvas de nivel de una determinada área. Propuesto antes de la explosión de la cartografía digital es un índice intuitivo, si bien su elaboración es intensiva en trabajo o solamente factible para determinadas áreas de tamaño reducido si su elaboración se realiza a partir de cartografía tradicional en papel.

La aparición de los modelos cartográficos digitales a pequeña escala geográfica, pero de amplia cobertura, favoreció la propuesta de otros índices de rugosidad que fueran fáciles de calcular mediante técnicas de *GIS* y comparables entre áreas distantes y de diferente naturaleza. La primera de estas propuestas se debe a Riley, DeGloria y Elliot (1999) y la idea es relativamente simple.

A partir de un modelo de elevación digital, la metodología para obtener los valores de rugosidad se basa en el análisis de las celdas vecinas, según se representa en la figura 2.

Para cada celda disponemos, procedente de un *DEM*, de un valor de altitud (referido al centro de la cuadrícula), de forma que es posible calcular un indicador de la rugosidad combinando las pendientes entre la celda de referencia (de color azul en la figura 2) y las celdas adyacentes (sólo las celdas contiguas, 8 en total, son consideradas en el ejemplo de la figura 2). Por ejemplo, la diferencia (en valor absoluto) entre la altitud de la celda azul y la celda situada justo encima de ella es un indicador de la pendiente entre estos dos puntos. Un *índice de rugosidad del terreno (TRI)* debe combinar de alguna forma todas las pendientes de las celdas adyacentes (8 en nuestro ejemplo). Es posible tomar como índice simplemente el valor máximo o mínimo de todas estas pendientes contiguas, pero un índice global debe situarse razonablemente entre estos dos valores extremos<sup>8</sup>. Una posibilidad es simplemente promediar de algún modo estas pendientes, otra utilizar métodos algo más sofisticados, como los Riley, DeGloria y Elliot (1999), que analizamos a continuación con algo más de detalle.

**FIGURA 2: Representación esquemática de la *grid* utilizada en el cálculo de la rugosidad del terreno**



<sup>8</sup> Vale la pena mencionar que en lo que en *ingeniería del terreno* se denomina un mapa de pendientes no es más que el valor máximo de todas estas pendientes entre una celda y sus adyacentes, ello es de especial utilidad en hidrología, puesto que el agua siempre busca la dirección de máxima pendiente como dirección de escape.

Más formalmente, sea  $e_{r,c}$  la altitud de la celda correspondiente a la fila  $r$  y a la columna  $c$ , el índice de rugosidad del terreno para la celda  $r, c$  propuesto por Riley, DeGloria y Elliot (1999) es simplemente:

$$TRI_{r,c} = \sqrt{\sum_{i=r-1}^{r+1} \sum_{j=c-1}^{c+1} (e_{i,j} - e_{r,c})^2} \quad (1)$$

Esta es la medida de rugosidad que utilizaremos, y cuyas celdas implicadas en el cálculo para la celda  $r, c$  pueden verse de forma clara en la figura 3. Consideramos conveniente, no obstante, realizar una serie de reflexiones en torno a cuestiones de medida antes de proceder a examinar los resultados.

FIGURA 3: DEM y celdas implicadas en el cálculo del índice de rugosidad

	columnas (c)		
filas (r)	$e_{r-1,c-1}$	$e_{r-1,c}$	$e_{r-1,c+1}$
	$e_{r,c-1}$	$e_{r,c}$	$e_{r,c+1}$
	$e_{r+1,c-1}$	$e_{r+1,c}$	$e_{r+1,c+1}$

Es fácil observar que (1) es básicamente un índice de dispersión de las elevaciones entre la celda central, para aquella que definimos la rugosidad, y todas sus vecinas, y donde la dispersión se mide respecto a la altitud de la celda central. Los cuadrados tienen la misión de tratar de forma simétrica las pendientes positivas y las negativas, de forma que a efectos de medición de la rugosidad nos es indiferente estar en las cumbres o en el fondo de los valles, lo que importa es la pendiente de nuestro entorno cercano.

Algunos ejemplos ilustrativos pueden ayudar a clarificar que hay detrás de los cálculos. La figura 4 ofrece ejemplos de modelos de elevación digital hipotéticos y el valor de la rugosidad para la celda central. El modelo (a) se corresponde con una cima montañosa, mientras que el modelo (b) se corresponde con una depresión que es justamente el inverso del modelo (a), y en consecuencia ambos casos tienen el mismo valor de la rugosidad. Por su parte el modelo (c), que también tiene el mismo valor del índice que en los dos casos anteriores, representa una situación muy diferente, se trata de una pendiente este-oeste relativamente acusada, pero constante en la dirección norte-sur. Así pues, un mismo valor del índice de rugosidad es consistente con diversas morfologías del terreno. Finalmente el modelo (d) representa una pendiente poco pronunciada y algo más ondulada que en el caso anterior, en consecuencia el valor del índice de rugosidad muestra un valor cuantitativamente menor.

FIGURA 4: **DEM hipotéticos y valor del TRI para la celda central**

100	125	100	200	175	200	98	200	302	200	210	220
125	200	125	175	100	175	98	200	302	210	225	225
100	125	100	200	175	200	98	200	302	205	210	220
(a) TRI = 250	(b) TRI = 250	(c) TRI = 250	(d) TRI = 42								

Las unidades de medida del índice de rugosidad se corresponden con las unidades utilizadas para medir las diferencias de altitud, que a su vez dependen de las unidades de medida del *DEM* de partida. En nuestros cálculos los modelos de elevaciones están en metros, por lo tanto la rugosidad viene expresada en metros de diferencia de cota entre puntos distantes entre sí 800 metros para *GTOPO30* y 80 metros para *SRTM*<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Esta es la diferencia entre puntos centrales de las celdas para cada *DEM* después de efectuada la reproyección. En realidad esta es la distancia entre las celdas este-oeste y norte-sur, para las celdas en diagonal esta distancia debe aumentarse por el factor de escala  $\sqrt{2}$ .

Aunque (1) es intuitivo, otras medidas alternativas de dispersión podrían ser consideradas una vez hemos calculado las diferencias de cota entre una celda y todas sus vecinas. Una alternativa obvia y razonable es simplemente la suma de valores absolutos,

$$TRI_{r,c}^{abs} = \sum_{i=r-1}^{r+1} \sum_{j=c-1}^{c+1} |e_{i,j} - e_{r,c}| \quad (2)$$

que es mucho más interpretable desde un punto de vista geográfico, ya que se trata simplemente de la suma de diferencia de elevaciones entre un punto y su entorno cercano. Los valores de  $TRI_{r,c}^{abs}$  para los ejemplos de la figura 4 son 700 para los modelos (a) y (b), 612 para el modelo (c) y 100 para el modelo (d)<sup>10</sup>. Obsérvese que ahora el modelo (c) aparece como menos rugoso que los modelos (a) y (b) que en el caso de la fórmula (1), donde los tres mostraban el mismo valor de la rugosidad, ya que se trata de índices que no son ordinalmente equivalentes. Así pues, la elección de un índice u otro puede condicionar nuestra visión sobre que superficies son más o menos rugosas, un aspecto al que la literatura no parece haberle prestado la suficiente atención.

Convenientemente promediada, la fórmula (2),  $\frac{1}{8}TRI_{r,c}^{abs}$ , representaría el tamaño promedio del escalón que debemos subir o bajar cuando cambiamos de celda, y se corresponde con la pendiente media de Nuun y Puga (2009).

Por supuesto, existen infinitas formas de medir la dispersión entre las celdas de la figura 3. Es posible acudir tanto a la estadística descriptiva, cómo a la literatura de la desigualdad, rica en índices que miden dispersión con diversas propiedades (Goerlich y Villar 2009). Sin embargo, este tipo de literatura suele medir la dispersión respecto al promedio, no respecto a una determinada observación concreta, como es  $e_{r,c}$  en nuestro caso. Así por ejemplo, si calculamos la desviación típica, entonces obtenemos que la rugosidad, medida

<sup>10</sup> Los ejemplos de los modelos (a), (b) y (d) de la figura 4 están tomados de Riley, DeGloria y Elliot (1999, figura 3). Resulta de interés señalar que los valores que estos autores dan como valores del índice de rugosidad se corresponden en realidad con la fórmula (2), mientras que su propuesta es la fórmula (1), Riley, DeGloria y Elliot (1999, figura1), si bien también aquí hay otro error en la codificación de la función, donde dice  $TRI = \text{sqr}(ssdiff)$  debe decir  $TRI = \text{sqrt}(ssdiff)$ .

según este índice, toma un valor de 30 para los modelos (a) y (b), 83 para el modelo (c) y 8 para el modelo (d). El modelo (c) aparece ahora como más rugoso que los modelos (a) y (b), justo lo contrario de lo que sucedía cuando utilizábamos (2) como fórmula de cálculo.

Lo que estos ejemplos intentan mostrar es que el índice particular para combinar las diferencias de cota entre una celda y todas sus vecinas no es una cuestión trivial, ya que puede proporcionar ordenaciones diferentes sobre que terreno es más o menos rugoso. Definiendo  $s_{i,j} = |e_{i,j} - e_{r,c}|$  sería posible definir una familia uni-paramétrica de índices de rugosidad a la constituida por las medias de orden- $\alpha$  para  $s_{i,j}$  (Steele 2004, cap. 8), y que engloban, como casos particulares, a los índices (1) y (2) convenientemente re-escalados, esto es:

$$TRI_{r,c}^{\alpha} = \left( \frac{1}{8} \sum_{i=r-1}^{r+1} \sum_{j=c-1}^{c+1} s_{i,j}^{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad \alpha > 0 \quad (3)$$

Así por ejemplo, para  $\alpha = 1$ ,  $TRI_{r,c}^1 = \frac{1}{8} TRI_{r,c}^{abs}$ , mientras que para  $\alpha = 2$ ,

$TRI_{r,c}^2 = \frac{1}{\sqrt{8}} TRI_{r,c}$ , por su parte, conforme  $\alpha \rightarrow \infty$ ,  $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} TRI_{r,c}^{\alpha} = \max_{i,j} \{s_{i,j}\}$ , con lo que

un mapa de rugosidades coincidiría con un mapa de pendientes<sup>11,12</sup>. Conviene señalar, sin embargo, que para los modelos de la figura 4 es posible demostrar que el modelo (c) aparece

<sup>11</sup> Esta coincidencia no es totalmente exacta. Los mapas de pendientes calculados en el análisis de superficies en geodesia la miden, no en términos absolutos, como en las fórmulas anteriores, sino en términos relativos (diferencia de cota entre celdas vecinas,  $s_{i,j}$ , dividida por la distancia lineal entre ambas celdas) o angulares (entre 0° y 90°), lo que la libera de las unidades de medida y tiene en consideración el hecho de que la distancia entre las celdas alineadas vertical u horizontalmente no es la misma que la existente entre las celdas en diagonal. Este último aspecto está ausente en las fórmulas anteriores, pero puede ser incorporado con facilidad.

<sup>12</sup> La restricción del espacio paramétrico en (3),  $\alpha > 0$ , se debe al hecho de que  $s_{i,j}$  puede tomar valores nulos, un caso bastante probable en este contexto. Cuando algún  $s_{i,j}$  es igual a cero entonces  $TRI_{r,c}^{\alpha} = 0$  para  $\alpha \leq 0$  (Magnus y Neudecker, 1988, Cap.-11). Si  $s_{i,j}$  fuera estrictamente positivo entonces es posible demostrar que  $\lim_{\alpha \rightarrow -\infty} TRI_{r,c}^{\alpha} = \min_{i,j} \{s_{i,j}\}$ , de forma que un solo parámetro,  $\alpha$ , nos daría todo el espectro de rugosidades posibles para una celda conforme varía de  $-\infty$  a  $+\infty$ .

como más rugoso que los modelos (a) y (b)<sup>13</sup> para  $\alpha > 2$ , pero como menos rugoso que dichos modelos para  $\alpha < 2$ .

La literatura sobre medición de la rugosidad no parece haber dedicado esfuerzos a buscar un índice que cumpla determinadas propiedades, sino a si el índice en cuestión capta otros aspectos relevantes de lo que debemos entender por rugosidad.

En concreto, Sappington, Longshore y Thompson (2007) observan que el índice propuesto por Riley, DeGloria y Elliot (1999) está fuertemente correlacionado con la pendiente, y en este sentido es incapaz de distinguir entre terrenos con fuertes pendientes, pero relativamente poco rugosos, de terrenos que teniendo pendientes importantes sean irregulares y quebrados, es decir tengan una rugosidad elevada. En cierta forma esta es una cuestión relacionada con la escala del *DEM* de partida, ya que un tamaño más pequeño de la celda debe ser capaz de reflejar mejor la rugosidad a escala reducida. Esto es evidente a partir de la observación de la *topografía muy rugosa* de la figura 1.

El punto de partida de estos autores es que una medida de rugosidad debe incorporar la variabilidad en dos atributos que siempre es posible medir a partir de un *DEM*: 1) la *pendiente* (*'slope'*), y 2) el *aspecto* (*'aspect'*). Estos son atributos que rutinariamente pueden calcular los programas de *GIS* (ESRI 2002).

En el análisis de superficies, se entiende *por pendiente de una celda (slope)* la máxima tasa de variación entre dicha celda y sus vecinas (i. e. la mayor variación en altitud en relación a la distancia entre la celda de referencia y todas sus vecinas). Por su parte, se entiende *por aspecto de una celda (aspect)* la dirección de la máxima pendiente entre la celda de referencia y sus vecinas. Se trata, por tanto, de un indicador de dirección de la pendiente, se mide en grados, desde 0° (norte) hasta 360° (de nuevo al norte), y que en un *DEM* tiene la interpretación de la orientación de las laderas.

Estos dos aspectos definen un plano para cada celda, de forma que la idea de Sappington, Longshore y Thompson (2007) es descomponer los vectores ortonormales a este plano para cada celda en sus tres componentes, *x*, *y* y *z*, mediante el uso de trigonometría

---

<sup>13</sup> Dada la simetría entre los modelos (a) y (b) estos muestran siempre la misma rugosidad para cualquier valor de  $\alpha$ .

estándar. La medida de rugosidad propuesta para la celda  $r, c$  suma las componentes de estos vectores para dicha celda y todas sus vecinas, y calcula la norma euclídea del vector resultante,

$$r_{r,c} = +\sqrt{\left(\sum_{i=r-1}^{r+1} \sum_{j=c-1}^{c+1} x_{i,j}\right)^2 + \left(\sum_{i=r-1}^{r+1} \sum_{j=c-1}^{c+1} y_{i,j}\right)^2 + \left(\sum_{i=r-1}^{r+1} \sum_{j=c-1}^{c+1} z_{i,j}\right)^2} \quad (4)$$

A partir de aquí, el *índice de rugosidad vectorial* propuesto por estos autores consiste simplemente en restar de 1 la magnitud  $r_{r,c}$  convenientemente normalizada (dividida por el número de celdas implicadas):

$$VRM_{r,c} = 1 - \frac{r_{r,c}}{9} \quad (5)$$

Este índice,  $VRM_{r,c}$ , carece de unidades, y varía entre 0, indicando un terreno totalmente plano, y 1, máxima rugosidad.

Aunque este índice tiene su atractivo, es la variabilidad en el aspecto de las celdas la que trata de recoger lo quebradizo del terreno, también presenta ciertos inconvenientes que no son resaltados por Sappington, Longshore y Thompson (2007) y en los que conviene que nos detengamos brevemente. Para un terreno plano, entonces la única componente que importa es la  $z$ , y esta toma el valor 1, mientras que las otras dos componentes,  $x$  e  $y$ , son nulas<sup>14</sup>; si esto es así para todas las celdas implicadas en el cálculo entonces  $VRM_{r,c} = 0$ , que es el mismo valor que tomaría  $TRI_{r,c} = 0$ . Pero consideremos ahora el caso extremo (hipotético) en el que la pendiente es de 90°; en este caso la componente  $z$  es nula, y sólo importan las componentes  $x$  e  $y$ . El vector ortonormal, base de los cálculos en la obtención de  $VRM_{r,c}$ , es perpendicular a la componente  $z$ . Si el aspecto de todas las celdas implicadas en

<sup>14</sup> El razonamiento que sigue supone que  $z$  es la componente que mide la altitud, mientras que  $x$  e  $y$  miden latitud y longitud. Esta es la convención en Sappington, Longshore y Thompson (2007, figura 2).

el cálculo fuera también de  $90^\circ$  (o de  $270^\circ$ ) entonces una de las componentes  $x$  e  $y$ , sería nula y la otra tomaría el valor 1. En estas condiciones  $VRM_{r,c} = 0$ , pero con tal pendiente (infinita, de hecho) nadie diría que se trata de un terreno con una baja rugosidad.

En definitiva, el  $VRM_{r,c}$  trata de forma simétrica la pendiente y la dirección de la misma, y no queda totalmente claro que esto sea adecuado. En relación con esta simetría, vale la pena observar que  $r_{r,c}$  jamás puede tomar un valor nulo, ni siquiera muy pequeño, y en consecuencia el límite superior de 1 para  $VRM_{r,c}$  es un límite teórico; en la práctica son de esperar valores mucho más bajos. Esta afirmación puede comprobarse fácilmente a partir de la figura 3 de Sappington, Longshore y Thompson (2007, p. 1423) en el que el valor máximo de  $VRM_{r,c}$  está siempre por debajo de 0.2, pero en la gran mayoría de los casos está por debajo de 0.025.

Ciertamente Sappington, Longshore y Thompson (2007) están en lo correcto cuando argumentan que los índices de rugosidad convencionales, como el de Beasom, Wiggers y Giordano (1983) o el de Riley, DeGloria y Elliot (1999), están muy correlacionados con la pendiente del terreno (de hecho están contruidos a partir de esta característica) y que no recogen un aspecto relacionado con la rugosidad, pero independiente de la pendiente, como es lo quebradizo del paisaje. En este sentido, es posible que su propuesta capte un componente de la rugosidad, independiente de la pendiente, que sea de interés para explicar la topografía de una determinada zona, y ello tenga aplicaciones en el estudio del hábitat de especies salvajes, pero no parece que este índice sea tremendamente útil para el estudio de los asentamientos humanos y su acceso a las infraestructuras. Por otra parte, la obtención de un índice que intente cuantificar lo quebradizo del terreno, independientemente de la pendiente, puede ser de interés en sí mismo, y para ello una medida de dispersión de los *aspectos de las celdas vecinas* en relación a la celda de referencia podría ser de utilidad.

Otra propuesta que merece cierta consideración es la realizada por Jenness (2004) en un contexto no directamente relacionado con la medición de la rugosidad. La idea es relativamente simple, la superficie de España es de  $505.990 \text{ km}^2$ , pero esta es su superficie plana (resultado de una proyección), sin tener en cuenta su grado de *montañosidad* del que hablamos en la introducción. Su superficie real es necesariamente superior, puesto que nuestro

país no es, en absoluto, plano. La relación entre ambas superficies constituye una medida de la rugosidad de terreno.

Jeness (2004) ha mostrado como calcular la superficie real del paisaje a partir de un *DEM*. El cálculo de esta superficie real se realiza celda a celda, por ejemplo para la celda  $r, c$  a partir de las celdas de la figura 3. Para ello, se determinan 8 triángulos delimitados por el cuadrado formado al unir los centros de todas las celdas exteriores en la figura 3, y obtenidos al unir el centro de la celda  $r, c$  con el centro de cada una de sus vecinas. Cada vértice de estos triángulos está en el centro de una celda, y en consecuencia le corresponde una elevación determinada. Aplicando dicha elevación obtenemos una aproximación en 3D al terreno, las superficies de los 8 triángulos pueden ser calculadas, al mismo tiempo que dicha superficie se restringe a los límites de la celda para la que estamos efectuando los cálculos. Esto proporciona una aproximación a la superficie real de la celda  $r, c$ ,  $S_{r,c}$ , que puede ser comparada con la superficie plana,  $P_{r,c}$ , y que viene dada por la resolución del *DEM*.

Un índice natural de rugosidad en este contexto vendría dado por la pérdida relativa de superficie al pasar de 3D a 2D debida a una distribución no uniforme de la altitud,

$$SRI_{r,c} = 1 - \frac{P_{r,c}}{S_{r,c}} \quad (6)$$

Este índice carece de unidades de medida, toma el valor 0 cuando el terreno es totalmente plano y aumenta conforme tenemos más superficie real en relación al tamaño de la celda. La cota superior de  $SRI_{r,c}$  es la unidad, si bien resulta obvio que este límite no se alcanzará nunca en situaciones reales.

En muchas ocasiones no estaremos interesados en la rugosidad de una celda, sino en la de determinadas áreas, por ejemplo un término municipal o una provincia. En estos casos resulta conveniente calcular ambas superficies para el área en la que estemos interesados y finalmente calcular el *índice de rugosidad superficial*,  $SRI$ , como  $SRI = 1 - \frac{P}{S}$ . Un tipo de agregación que no es posible efectuar en los casos anteriores.

No hemos encontrado aplicaciones directas de este índice para nuestro problema concreto pero creemos de interés su cálculo y comparación con el índice (1), que es el utilizado en este trabajo.

El repaso de la literatura indica que existen numerosas cuestiones pendientes, y en consecuencia hay posibilidades para explorar como mejorar las mediciones en el futuro. Ello hace referencia tanto a cuestiones conceptuales: rugosidad y pendiente, ¿debe jugar el aspecto algún papel en la medida de la rugosidad?,...etc.; como a las propiedades que los índices deben cumplir, ya que como hemos observado, incluso aceptando la característica a medir, diversos índices pueden proporcionarnos distintas visiones sobre si un determinado terreno es más o menos rugoso que otro.

En lo que respecta a nuestra aplicación utilizaremos el índice de Riley, DeGloria y Elliot (1999), fórmula (1), calculado para cada celda y agregado para los términos municipales en la forma que exponemos a continuación. Puesto que aplicaremos la misma fórmula a dos *DEM* de distinta escala, en *GTOPO30* la celda tiene una longitud 10 veces mayor que en *SRTM*, una cuestión se suscita de forma natural: ¿cuál es la escala apropiada para el análisis? Como han señalado ciertos autores (Bissonette 1997) no existe una respuesta universal a esta cuestión y la escala de análisis debe equipararse al problema bajo consideración<sup>15</sup>.

En nuestro caso se trata finalmente de analizar como aspectos geográficos afectan a los asentamientos humanos descendiendo a una escala municipal. De los 8.108 municipios del censo de 2001 tan sólo 16 tienen una superficie inferior al  $\text{km}^2$ , y sólo 7 inferior a la superficie de una celda del *GTOPO30* (después de la re-proyección),  $0,64 \text{ km}^2$ , por ello, este modelo no puede descartarse *a priori*, aunque ciertamente para algunos municipios los resultados serán limitados<sup>16</sup>. El tamaño de la celda del *SRTM*,  $0,0064 \text{ km}^2$  o  $6.400 \text{ m}^2$ , es proba-

---

<sup>15</sup> Es conocido que datos tabulados a diferentes escalas pueden proporcionar resultados que no son necesariamente consistentes entre sí, se trata de un *efecto de escala* que forma parte de un problema más general bien conocido en el análisis de datos geográficos: el *problema de la modificación del tamaño de la unidad de análisis* ('*modifiable areal unit problem*', *MAUP*, Wong y Lee, 2005, p. 7). Por ello dedicaremos a continuación un apartado a examinar la consistencia entre los resultados derivados de ambos *DEM*.

<sup>16</sup> De hecho para los municipios de menor tamaño el modelo *GTOPO30* es incapaz de asignar un valor de altitud media al polígono municipal.

blemente más adecuado a nuestra escala de análisis para idéntica fiabilidad de los datos originales en ambos modelos, ya que ningún municipio tiene una superficie inferior al tamaño de celda del *SRBM*<sup>17</sup>. Parte de los resultados que se ofrecen a continuación consisten en la comparación de ambos modelos, no sólo a nivel municipal, sino también provincial, donde los efectos de escala deben jugar un menor papel.

### 3.1. Índices de rugosidad a escala provincial y municipal

Partiendo de los *DEM* ya procesados, tal y como se ha indicado anteriormente, el cálculo del índice de rugosidad para cada celda,  $TRI_{r,c} = \sqrt{\sum_{i=r-1}^{r+1} \sum_{j=c-1}^{c+1} (e_{i,j} - e_{r,c})^2}$ , se obtiene a partir de un *script* en formato *AML* (*Arc Macro Language*) ejecutado en ArcInfo Workstation<sup>18</sup>. Esto genera un *DTM* de rugosidades para cada uno de los *DEM* y con la misma resolución que el *DEM* de partida.

Puesto que estos cálculos se realizan con el *buffer* mencionado anteriormente, al objeto de no falsear los resultados de las zonas frontera, la extracción del contorno exacto del estado español se realiza mediante la herramienta *Extraction/Extract by Mask* que ofrece *Spatial Analyst* a partir del fichero de contornos del INE, en este caso sin ningún tipo de *buffer* añadido.

Una vez calculado el  $TRI_{r,c}$  para cada celda se obtienen los valores del índice de rugosidad para cada provincia (incluyendo los territorios históricos) y para cada uno de los municipios del censo de 2001 mediante la intersección del *DTM* de los *TRI* con el fichero de polígonos municipales del INE, y tomando como valor de rugosidad de la provincia o del

---

<sup>17</sup> El municipio de menor tamaño es Emperador (46117), en la provincia de Valencia, con una superficie de 0,03 km<sup>2</sup>, según datos del *IGN*. Debe observarse, sin embargo, que para los municipios más pequeños existen discrepancias entre la superficie proporcionada por el *IGN* es su base de datos municipal y la que se deriva de la geometría de los polígonos de la cartografía digital en formato vectorial.

<sup>18</sup> Dicho *script* está disponible en ESRI, <http://arcsripts.esri.com/details.asp?dbid=12435>.

Una alternativa más sencilla sería la utilización de una rutina en Visual Basic para ArcGIS, como la disponible en Crawford (2008, Apéndice C), sin embargo en este caso encontramos limitaciones en el número de celdas a manejar y los cálculos son notablemente más lentos. Obsérvese que en el caso del modelo *SRTM* el número de celdas excede los 70 millones.

municipio correspondiente el promedio de valores de rugosidad de todas las celdas que caen dentro del contorno provincial o municipal. En términos de análisis espacial es lo que se denominan estadísticos de zona y se implementa en la práctica mediante la herramienta *Zonal Statistics as Table de Spatial Analyst*<sup>19</sup>.

#### 4. Una comparativa general de los modelos *GTOPO30* y *SRTM*

CONVIENE comenzar el análisis de resultados con una comparativa de los dos *DEM* de partida al objeto de determinar si existen razones fundadas para preferir uno u otro como base de cálculo. A nivel global, y para los datos de altitud originales, existe una alta correlación entre ambos modelos. Para poder realizar una mejor comparativa, y puesto que la morfología del terreno y los métodos de teledetección pueden ser diferentes en la península que en los territorios insulares efectuamos los cálculos para la península, Illes Balears y Canarias por separado. Examinando a continuación los resultados a nivel provincial y municipal.

ArcGIS es capaz de determinar la correlación entre dos *raster*, incluso aunque su resolución sea diferente<sup>20</sup>. En este caso, la correlación entre los datos de altitud en ambos modelos es muy elevada, 0,98 para la península, 0,89 para Illes Balears y 0,95 para Canarias. Agregando las celdas de *SRTM* al tamaño de las de *GTOPO30*, al objeto de hacer los cálcu-

---

<sup>19</sup> La aplicación de dicha herramienta calcula diversos estadísticos para un conjunto de celdas delimitado por un contorno, en nuestro caso un polígono de un fichero vectorial (*shape*). El valor que se toma como índice de rugosidad para el polígono (provincia o municipio) es el promedio de los valores de las celdas que caen dentro del contorno, pero obtenemos otros estadísticos de interés y que no examinamos en este trabajo.

En concreto, disponemos de: (i) el número de celdas que entran en el cálculo (*COUNT*), (ii) la superficie que ocupan dichas celdas (*AREA*), (iii) valores mínimo (*MIN*), máximo (*MAX*) y el rango (*RANGE*), (iv) promedio (*MEAN*), que es el valor de *TRI* atribuido al polígono, desviación típica (*STD*) y suma (*SUM*), (v) número de valores únicos (*VARIETY*), (vi) valores que se repiten más (*MAJORITY*) o menos (*MINORITY*), y (vii) mediana (*MEDIAN*), que constituiría una alternativa al *TRI* del polígono bajo consideración.

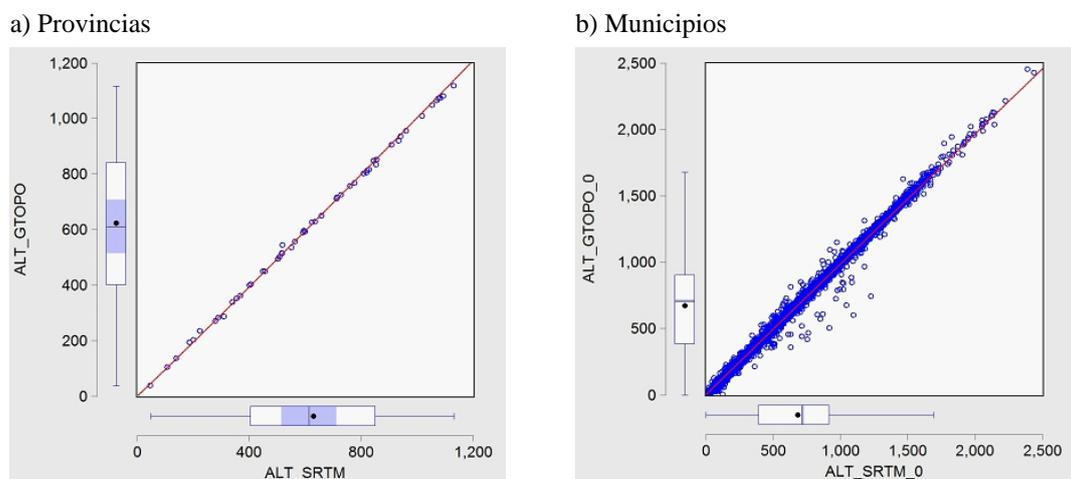
<sup>20</sup> Ello es accesible a través de la opción *Band Collection Statistics de Multivariate* en *Spatial Analyst*.

los más comparables obtenemos prácticamente los mismos resultados. Una correlación idéntica para la península e Illes Balears, y ligeramente más baja para Canarias, 0,93.

Cuando agregamos a los niveles de escala geográfica que son de nuestro interés obtenemos, sin embargo, algunos resultados que merecen ser observados con algo más de detenimiento.

La figura 5 muestra un diagrama de dispersión entre las altitudes medias a nivel provincial y municipal para ambos *DEM*. El ajuste es muy bueno, con coeficientes de correlación unitarios (hasta 2 decimales) tanto para las provincias como para los municipios, y tanto para los niveles como para los *rankings* (coeficiente de correlación de *Spearman*). Sin embargo, el gráfico a escala municipal permite observar un número importante de observaciones por debajo de la línea de regresión lo que nos indica la conveniencia de un análisis más detallado.

FIGURA 5: Comparación de altitudes a partir del *GTOPO30* y del *SRTM*



Los contrastes habituales de igualdad de medias, medianas y varianzas permiten aceptar la hipótesis nula en todos los casos a ambas escalas geográficas<sup>21</sup>. Sin embargo un contraste estadístico de “igualdad de ambos modelos”, implementado como un contraste de

<sup>21</sup> Los cálculos estadísticos de este trabajo han sido realizados con EViews 6 y con WinRats 7.02.

$H_0: \alpha = 0$  y  $\beta = 1$  en  $\log(ALT_{GTOPO30}) = \alpha + \beta \log(ALT_{SRTM}) + u$ , es rechazado tanto a nivel provincial como municipal<sup>22</sup>. Recuperando predicciones en niveles a partir del modelo log-lineal y definiendo como *outlier* todo residuo que exceda, en valor absoluto, a 3 veces su error estándar encontramos a nivel provincial un solo residuo, Málaga, ligeramente visible en el panel (a) de la figura 1.

A nivel municipal el análisis es mucho más revelador, en sólo 3 provincias se concentran 2/3 de los 97 *outliers* detectados. Destaca Santa Cruz de Tenerife, con 40 *outliers*, un 80% de sus municipios. En este caso encontramos valores atípicos tanto por exceso como por defecto, siendo los municipios más afectados los más montañosos, situados en las islas de Tenerife, La Gomera y La Palma. Las otras dos provincias atípicas representan casos opuestos. Por una parte, Las Palmas, con 12 *outliers*, una tercera parte de sus municipios. Es en esta provincia donde encontramos los mayores valores atípicos, pero lo más llamativo es que son todos ellos negativos, al contrario de lo que sucede con la otra provincia canaria, Santa Cruz de Tenerife, donde los *outliers* se alternan en signo. Para estas dos provincias encontramos los menores coeficientes de correlación entre altitudes municipales, 0.96 para Las Palmas y 0.89 para Santa Cruz de Tenerife. Las observaciones más alejadas de la diagonal en el panel (b) de la figura 5 pertenecen a la provincia de Las Palmas. Como caso extremo de mala sincronía entre los modelos *GTOPO30* y *SRTM* puede considerarse el caso del municipio de Tejeda (35025), en la isla de Gran Canaria; mientras que la altitud media derivada de *GTOPO30* para este municipio es de 682 m la que obtenemos de *SRTM* es de 1.042 m<sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup> El mismo resultado se obtiene si utilizamos un modelo lineal  $ALT_{GTOPO30} = \alpha + \beta ALT_{SRTM} + u$ . En el caso de la altitud resulta difícil discriminar estadísticamente entre ambos modelos, lineal o *log*-lineal, sin embargo, puesto que en el caso de la rugosidad un modelo *log*-lineal parece mucho más adecuado (la dispersión crece con el nivel) hemos decidido utilizar modelos logarítmicos en todos los casos. Para recuperar predicciones y residuos en niveles cuando hemos estimado el modelo en logaritmos, seguimos el procedimiento no paramétrico propuesto por Wooldridge (2003, p. 207), ya que la hipótesis de normalidad es generalmente rechazada.

<sup>23</sup> El rango de altitudes para este término municipal oscila entre 437 y 1.050 m para *GTOPO30*, pero es considerablemente mayor para *SRTM*, entre 154 y 1.948 m. Un mapa *raster* escala 1/25.000, bajado como *Web Map Service (WMS)*, permitió comprobar que los datos correctos eran los del *SRTM*, lo que también sucedía en otros casos anómalos.

Por otra parte, Málaga, con 11 *outliers*, en este caso todos positivos. Resulta de interés destacar que las otras dos provincias con mayor número de *outliers* son también andaluzas, Granada (8) y Almería (4)<sup>24</sup>. Al contrario que en el caso de Canarias, no parece que en este caso la falta de sincronía entre ambos modelos se deba a una mala calidad de los datos de *GTOPO30*, sino más bien a efectos de escala.

La misma comparación entre modelos puede ser efectuada en términos del índice de rugosidad, *TRI*. La correlación entre los *raster* de rugosidades, cada uno con su resolución, es de 0,71 para la península, 0,66 para Illes Balears y 0,38 para Canarias. Detrás de esta baja correlación para Canarias está la discrepancia entre los datos originales de altitud que acabamos de señalar y cuyo origen parece ser la mala calidad de *GTOPO30* para esta zona<sup>25</sup>. Utilizando valores de *SRTM* agregados a celdas del tamaño de *GTOPO30* entonces la correlación es algo mayor en todos los casos, 0,82 para la península, 0,87 para Illes Balears y 0,63 para Canarias.

Dejando al margen el caso de Canarias, y puesto que la correlación entre modelos se eleva de forma significativa al agregar los datos, resulta de interés indagar brevemente si este efecto de escala podría recoger morfologías singulares de áreas montañosas. Por ejemplo, grandes desniveles continuados o pequeños desniveles pero muy alternados (terreno en dientes de sierra), de forma que ambos modelos de altitud, con su diferente resolución, podrían dar lugar a valores de rugosidad poco relacionados entre sí, indicando que diferentes aspectos de la morfología del terreno son recogidos por la diferente escala de partida en los datos. Examinando los índices de rugosidad a escala provincial y municipal es posible avanzar de forma tentativa en esta cuestión.

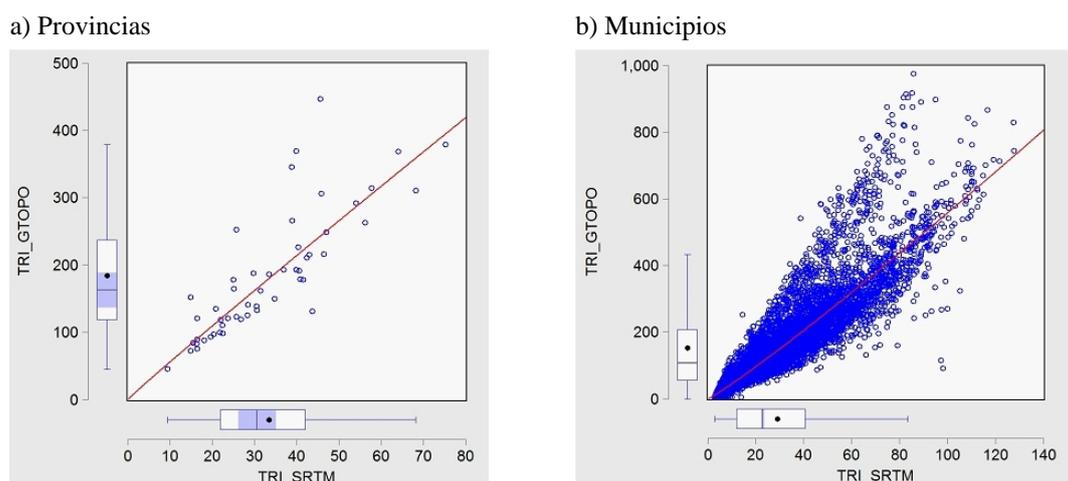
---

<sup>24</sup> Es conveniente indicar que si examinamos los *outliers* en el modelo *log*-lineal, de forma que lo que interesa son las discrepancias relativas, entonces la estructura de valores atípicos es sustancialmente diferente, pero sigue sin ser aleatoria. De los 134 *outliers* detectados la mayor concentración la encontramos en la provincia de Valencia (32), seguida de A Coruña y Vizcaya (13), Girona (12) y Alicante (10). También aparece Melilla, que es el único *outlier* a escala provincial en este caso. Desconocemos si la precisión altimétrica de los *DEM* de partida está relacionada con la altitud, pero las mayores discrepancias relativas tienden a concentrarse en municipios de provincias con una altitud relativamente baja.

<sup>25</sup> Para la isla de Gran Canaria esta correlación es solamente de 0.16, lo que confirma la mala calidad de los datos originales de *GTOPO30* para esta zona.

La figura 6 es la equivalente a la figura 5 en términos del índice de rugosidad, *TRI*, a nivel provincial y municipal para ambos *DEM*. La correlación entre ambos modelos es razonablemente elevada, y mayor que en las comparaciones celda a celda. A nivel provincial la correlación es de 0,82 en niveles y 0,88 en logaritmos, y a nivel municipal es incluso algo mayor, 0,89 en niveles y 0,93 en logaritmos. Para los *rankings* (coeficiente de correlación de *Spearman*) encontramos magnitudes comparables a la correlación en logaritmos, 0,86 para las provincias y 0,95 para los municipios. A ambos niveles de agregación geográfica es posible observar valores relativamente alejados del comportamiento promedio, por lo que examinamos a continuación si estos siguen un patrón que podamos relacionar con la morfología del terreno.

FIGURA 6: Comparación de rugosidades (*TRI*) a partir del *GTOPO30* y del *SRTM*



Así por ejemplo, es posible pensar en situaciones con diferencias de altitud importantes pero regulares, que el modelo *SRTM* frente al *GTOPO30* podría atenuar en exceso. En este caso deberíamos esperar residuos positivos geográficamente concentrados al estimar un modelo del tipo  $\log(TRI_{GTOPO30}) = \alpha + \beta \log(TRI_{SRTM}) + u$ . Una situación que podríamos denominar rugosidad de carácter grueso o *macrorugosidad*.

Por el contrario, podríamos pensar en situaciones con topografías muy quebradas de forma continuada, en las que el modelo *GTOPO30*, debido a su mayor tamaño de celda,

suaviza en exceso los posibles saltos de altitud. En esta situación es de esperar que el modelo *SRTM*, dada su mayor resolución, se ajuste mejor a la morfología del terreno y en términos del modelo anterior obtuviéramos residuos negativos espacialmente concentrados. A una situación de este tipo la podríamos denominar rugosidad de carácter fino o *microrugosidad*.

Es necesario mencionar previamente que la correlación entre índices de rugosidad municipal, evaluada por provincias, es especialmente baja en el caso de las provincias Canarias, 0,58 para Las Palmas y 0,49 para Santa Cruz de Tenerife, por ello y dado que la causa más probable de esta baja correlación son las discrepancias entre los datos de altitud de los dos *DEM*, hemos excluido estas dos provincias en el análisis que sigue a continuación, ya que su consideración no haría sino distorsionar los resultados.

A nivel provincial un modelo *log*-lineal, estimado por mínimos cuadrados ordinarios, generó los siguientes resultados<sup>26</sup>,

$$\hat{\log}(TRI_{GTOPO30}) = 1.746 + 0.985 \log(TRI_{SRTM}) \quad n = 50 \quad (7)$$

$$(0.235) (0.068) \quad R^2 = 0.783$$

y donde entre paréntesis figuran los errores estándares consistentes frente a heteroscedasticidad (White 1980). La hipótesis  $H_0: \beta = 1$  no puede ser rechazada, con un *p-value* de 0,829.

Recuperando los niveles a partir de (7) y examinando los residuos, vemos que estos presentan un elevado nivel de concentración geográfica. Los cuatro residuos mayores positivos, claramente visibles en la figura 6 (a), corresponden, en orden decreciente a Málaga, Granada, Almería y Cádiz. En el otro extremo, los residuos negativos, se sitúan en el noreste peninsular, concentrados en la provincias vascas (Guipúzcoa y Vizcaya), Cataluña (Barcelona, Tarragona y Girona) y la Comunidad Valenciana (Castellón y Valencia).

Los resultados son, de nuevo, mucho más reveladores a nivel municipal. El modelo *log*-lineal generó los siguientes resultados,

---

<sup>26</sup> Medidas de bondad del ajuste comparables tienden a favorecer, en este caso, el modelo *log*-lineal, frente a modelo lineal.

$$\hat{\log}(TRI_{GTOPO30}) = 1.289 + 1.095 \log(TRI_{SRTM}) \quad n = 8,021$$

$$(0.094) (0.029) \quad R^2 = 0.875 \quad (8)$$

y donde entre paréntesis figuran errores estándares consistentes frente a heteroscedasticidad y correlación espacial utilizando la provincia como *cluster*<sup>27</sup>. La hipótesis  $H_0: \beta = 1$  es ahora rechazada con un amplio margen de confianza (*p-value* de 0,001).

Recuperando los niveles a partir de (8) y examinando los residuos, vemos que estos presentan un elevado nivel de concentración geográfica que se corresponde con las provincias señaladas anteriormente. Examinando el 10% de los municipios con mayores residuos a cada lado de la distribución, esto es, los 802 municipios con mayores residuos, indicativos de una topografía *macrorugosa*, y los 802 municipios con menores residuos, indicativos de una topografía *microrugosa*, obtenemos los resultados de las figuras 7 y 8 respectivamente, indicativos de una fuerte concentración espacial de los residuos extremos.

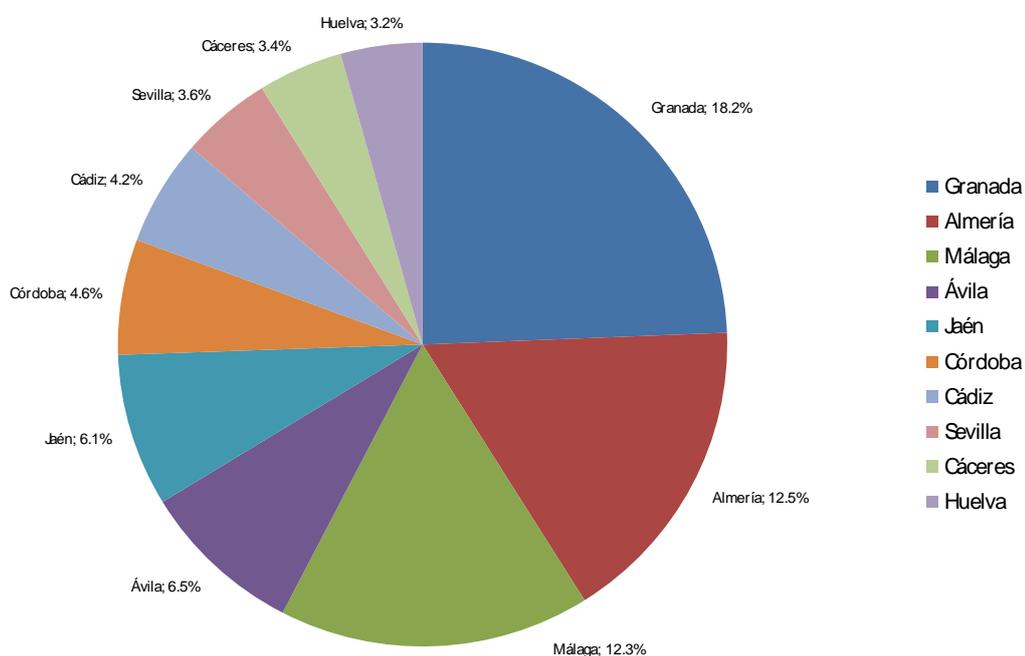
La figura 7 indica que, de los 802 municipios con mayores discrepancias, el 43% de estos se localizan en solo 3 provincias andaluzas vecinas, Granada, Almería y Málaga, y un 75% de los mismos en las 10 provincias mostradas en el gráfico. El predominio de las provincias andaluzas es evidente. Una explicación plausible se basa en las singulares características geomorfológicas de Sierra Nevada, que ofrece unas peculiaridades en cuanto a altitud y pendiente de sus vertientes que no se repiten en el resto de cordilleras españolas y ello explicaría la alta concentración de municipios con discrepancias positivas en las provincias mencionadas.

La figura 8 mira al otro lado de la distribución, los municipios con mayores discrepancias negativas. Aunque las diferencias entre ambos modelos son aquí menos acusadas, la concentración geográfica se produce en el norte y noreste peninsular. El 21,6% de los 802 municipios con mayores discrepancias negativas se sitúan en las provincias de Navarra, Guipúzcoa y Vizcaya, territorio caracterizado por una red hidrográfica densa, con altitudes no muy elevadas, pero con mucha alterancia y poca superficie plana. Además, también destacan provincias catalanas (Barcelona, Tarragona y Girona) y de la Comunidad Valenciana (Castellón y Valencia). Las 9 provincias incluidas en el gráfico representan el 61% del total de municipios con mayores discrepancias negativas.

---

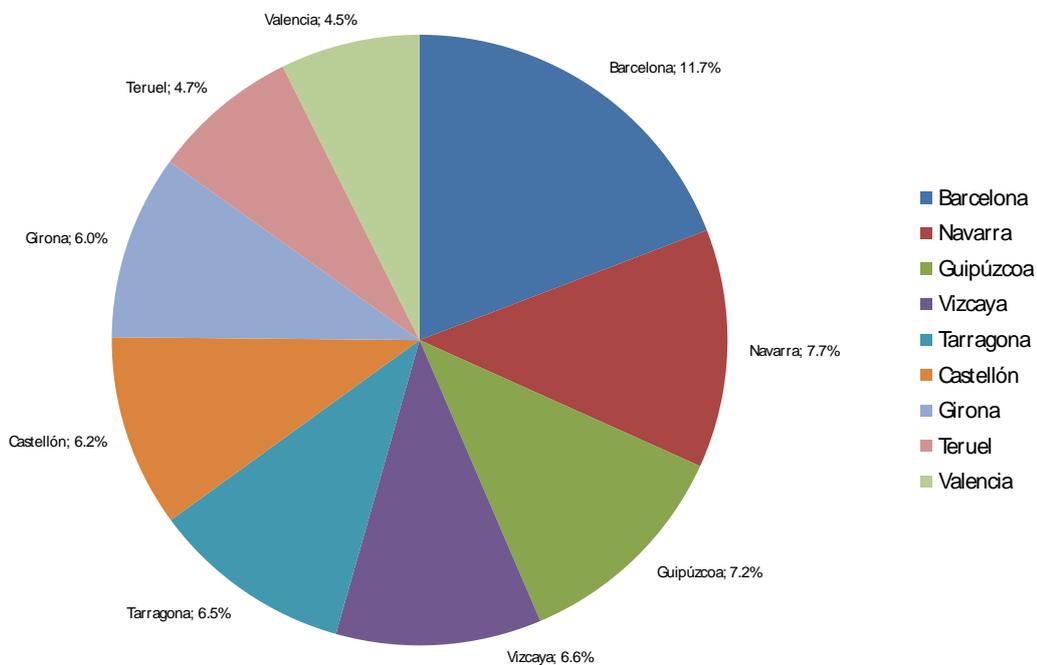
<sup>27</sup> Se trata simplemente de una generalización de los errores estándares de Hansen (1982)-White (1980) a una situación de dependencia en el corte transversal basada en Conley (1999), y que utiliza la provincia del municipio como *cluster*, es decir los errores estándar incorporan correlación espacial dentro de la provincia.

FIGURA 7: Macrorugosidad por provincias



**Nota:** Porcentaje de municipios por provincias sobre los 802 municipios mayores discrepancias positivas.

FIGURA 8: Microrugosidad por provincias



**Nota:** Porcentaje de municipios por provincias sobre los 802 municipios con mayores discrepancias negativas.

## 4.1. Conclusiones sobre los *DEM* de partida

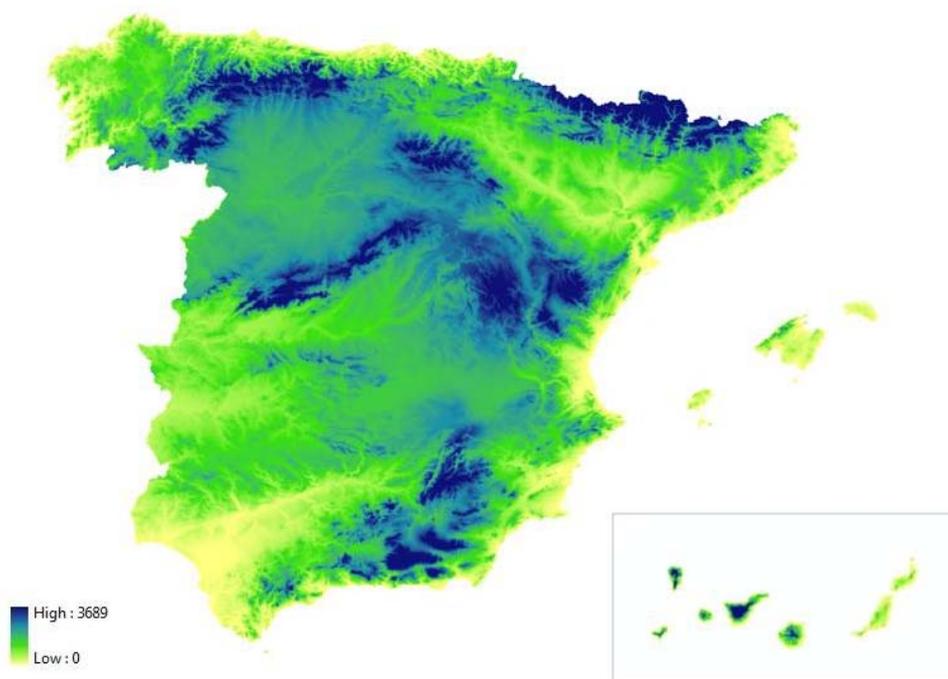
Este apartado sobre la comparación de los datos de partida, *GTOPO30 versus SRTM*, arroja algunos resultados interesantes, al mismo tiempo que nos permite seleccionar de forma bastante clara uno de los dos modelos para trabajo posterior:

- El modelo *GTOPO30*, que es el que presenta menos precisión, parece cuestionable en el ámbito de las islas Canarias.
- Para el resto del territorio español, donde los *DEM* presentan valores comparables, las discrepancias entre los valores de rugosidad obtenidos a partir de ambos modelos pueden explicarse por efectos de escala, de forma que una topografía singular puede ser la causa de esta situación. Así, el modelo *SRTM* tiende a suavizar en exceso grandes desniveles continuados frente al modelo *GTOPO30*, dado el mayor tamaño de celda de este último. Por el contrario, el modelo *GTOPO30*, precisamente por la misma razón, tiende a suavizar, frente al modelo *SRTM*, la morfología contraria, pequeños desniveles pero muy alternados.
- Si el argumento anterior se confirmara, la rugosidad derivada de ambos modelos ofrecería información extra de aquella que proporcionan cada modelo por separado. Sin embargo, la elevada correlación obtenida a nivel agregado permite concluir que, como primera aproximación, uno de los dos modelos es suficiente para el estudio de la característica del terreno en la que estamos interesados.
- Dada la mayor precisión (altimétrica y planimétrica) del modelo *SRTM*, la ausencia de valores anómalos en el ámbito de Canarias, el hecho de que todos los municipios presentan una superficie mayor al tamaño de celda en dicho modelo, y que dada la escala a la que deseamos trabajar, municipal, la rugosidad de carácter fino (*microrugosidad*) parece una característica del terreno especialmente relevante, nos decantamos por seleccionar el modelo *SRTM* como base de todos los análisis posteriores.

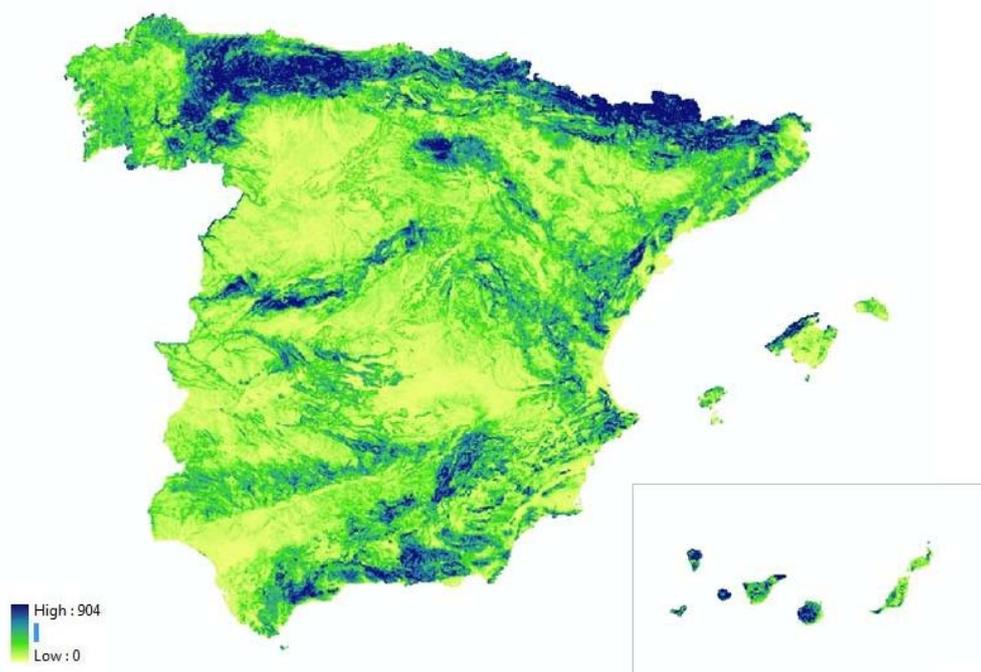
## 5. Altitud y rugosidad

UNO de los objetivos de este trabajo era elaborar un índice de *montañosidad* que recogiera un aspecto de la geografía diferenciado de la altitud. Que el índice de rugosidad del terreno calculado incide sobre una característica sustancialmente diferente de la altitud es evidente a partir de la inspección visual de los mapas 1 y 2. El mapa 1 muestra el *DEM* de partida, mientras que el mapa 2 muestra el índice de rugosidad, *TRI*, calculado a partir de él, ambos en formato *raster*, y permiten observar como algunas de las áreas más elevadas de la península se corresponden con valores de rugosidad bajos o moderados. La correlación global entre ambos modelos es reducida, aunque ligeramente positiva, 0,34.

MAPA 1: Modelo digital de elevaciones. *SRTM*



MAPA 2: Modelo digital de rugosidades. SRTM



Dicha correlación disminuye con el nivel de agregación. Así, a nivel municipal sigue siendo ligeramente positiva, 0,26, aunque algo inferior que a nivel global; mientras que a nivel provincial la correlación es prácticamente nula,  $-0,04$ .

Para examinar la distribución de la heterogeneidad del terreno mostrada en el mapa 2, utilizamos el procedimiento de Riley, DeGloria y Elliot (1999) y dividimos el rango de valores del índice de rugosidad en 7 clases de *igual área*, y en consecuencia distinta longitud de intervalo. Los intervalos resultantes de esta clasificación son los siguientes:

- Terreno plano: [0, 6]
- Terreno casi plano: (6, 10]
- Rugosidad ligera: (10, 16]
- Rugosidad intermedia: (16, 26]
- Rugosidad moderada: (26, 41]
- Rugosidad elevada: (41, 65]
- Rugosidad extrema: (65, 904]

Lógicamente cuando promediamos los datos a nivel municipal los extremos de la distribución se suavizan (el máximo es ahora 127,8), pero la *montañosidad* de España es evidente<sup>28</sup>. La distribución de municipios según los intervalos anteriores se muestra en el cuadro 1.

**CUADRO 1: Distribución del índice de rugosidad por municipios**

	Intervalo	Municipios		
		Número	Porcentaje	
1	Terreno plano	[0, 6]	431	5,32%
2	Terreno casi plano	(6, 10]	1.151	14,20%
3	Rugosidad ligera	(10, 16]	1.323	16,32%
4	Rugosidad intermedia	(16, 26]	1.550	19,12%
5	Rugosidad moderada	(26, 41]	1.663	20,51%
6	Rugosidad elevada	(41, 65]	1.352	16,67%
7	Rugosidad extrema	> 65	638	7,87%
			8.108	100,00%

*Nota:* Índice de rugosidad basado en el modelo *SRTM*.

Resulta interesante realizar el mismo ejercicio para los datos de altitud. Dividiendo el rango de valores de altitud en 7 clases de igual área, y por tanto distinta longitud de intervalo, obtenemos la siguiente clasificación: [0, 246], (246, 420], (420, 608], (608, 752], (752, 882], (882, 1,099] y > 1,099. La distribución de municipios según estos intervalos se muestra en el cuadro 2, que permite observar una distribución más homogénea que en caso de la rugosidad. El índice de Gini para la distribución municipal de la rugosidad resulta ser del 0,398, mientras que para la altitud promedio es ligeramente más baja, del 0,307.

La distribución por municipios de frecuencias bivalente *altitud-rugosidad* se ofrece en el cuadro 3. En ella observamos la baja correlación que mencionábamos al principio de este apartado. Si bien es cierto que los municipios más elevados tienden a mostrar una rugo-

<sup>28</sup> Nuun y Puga (2009, p.-4) calculan el índice de rugosidad de Riley, DeGloria y Elliot (1999) para algunos países a partir del modelo *GTOPO30*, no obstante no ofrecen el valor del índice para España. Utilizando el mismo *DEM* que estos autores y el mismo índice, nosotros obtenemos para España (incluidas las islas) un valor de 161,4 m de diferencia en altitud promedio, lo que situaría a nuestro país en un valor de la rugosidad intermedio entre Rumanía (126,7) e Italia (245,8).

sidad por encima de la media<sup>29</sup>, observamos como existen municipios de baja altitud con rugosidades moderadas y al mismo tiempo municipios de altitud media considerable con niveles de rugosidad baja. De hecho, la moda de la distribución conjunta la encontramos en los municipios en el rango de altitudes de (752, 882] y una topografía casi plana, (6, 10] de intervalo de rugosidades, con un total de 387 municipios. Este es también el intervalo de altitudes con mayor concentración de municipios en terreno plano, [0, 6] de intervalo de rugosidades.

**CUADRO 2: Distribución de la altitud por municipios**

	Intervalo	Municipios	
		Número	Porcentaje
1	[0, 246]	1.223	15,08%
2	(246, 420]	945	11,66%
3	(420, 608]	1.104	13,62%
4	(608, 752]	1.120	13,81%
5	(752, 882]	1.424	17,56%
6	(882, 1,099]	1.346	16,60%
7	> 1,099	946	11,67%
		8.108	100,00%

*Nota:* Altitud media del término municipal basada en el modelo *SRTM*.

En consecuencia, parece evidente que el indicador obtenido es un índice válido como forma de cuantificar la heterogeneidad del terreno, e incorpora información sustancialmente diferente de la altitud. Así por ejemplo, a un mayor nivel de agregación, las provincias que se nos muestran como más rugosas son Oviedo, Guipúzcoa y Santa Cruz de Tenerife, que muestran altitudes medias moderadas (salvo quizá el caso de Santa Cruz de Tenerife cuya altitud media es de 809 m); sin embargo Segovia, Soria y Guadalajara, todas ellas con altitudes medias superiores a los 1.000 m, muestran valores del índice de rugosidad entre ligero y moderado, 16,4, 22,5 y 28,3 m de diferencia en altitud promedio respectivamente.

<sup>29</sup> Es de señalar, no obstante, que la moda de la distribución condicionada para el intervalo de mayor altitud (por encima de 1.099 m) la encontramos para un grado de rugosidad moderada.

CUADRO 3: Distribución por municipios de frecuencias relativas altitud-rugosidad

			Terreno		Rugosidad					
			Plano	Casi plano	Ligera	Intermedia	Moderada	Elevada	Extrema	
			1	2	3	4	5	6	7	
			[0, 6]	(6, 10]	(10, 16]	(16, 26]	(26, 41]	(41, 65]	> 65	
Altitud (metros)	1	[0, 246]	1,53%	2,81%	2,36%	2,69%	3,59%	1,96%	0,15%	15,08%
	2	(246, 420]	0,27%	1,48%	2,32%	2,33%	2,18%	2,18%	0,89%	11,66%
	3	(420, 608]	0,07%	1,23%	1,85%	3,38%	3,53%	2,21%	1,34%	13,62%
	4	(608, 752]	1,23%	2,43%	1,99%	2,12%	2,81%	2,38%	0,85%	13,81%
	5	(752, 882]	1,81%	4,77%	3,38%	2,57%	2,17%	2,15%	0,72%	17,56%
	6	(882, 1,099]	0,39%	1,43%	3,87%	4,16%	3,05%	2,63%	1,07%	16,60%
	7	> 1,099	0,00%	0,04%	0,56%	1,87%	3,18%	3,17%	2,85%	11,67%
			<b>5,32%</b>	<b>14,20%</b>	<b>16,32%</b>	<b>19,12%</b>	<b>20,51%</b>	<b>16,67%</b>	<b>7,87%</b>	<b>100,00%</b>

Nota: Altitud media e índice de rugosidad basado en el modelo SRTM. En rojo se muestran los valores por encima del 2,5%.

## 6. Rugosidad del terreno y distribución de la población

COMO ejemplo de la utilidad del indicador de rugosidad calculado examinaremos brevemente la relación entre esta característica del terreno y la distribución de la población municipal a lo largo del siglo XX.

Sin embargo, antes de examinar esta relación comentaremos sobre un aspecto colateral que nuestros cálculos permiten estudiar. A partir de un *DEM* es trivial calcular valores promedio de altitud para determinadas zonas; de esta forma obtenemos la altitud media de los términos municipales a fecha del censo del 2001, no conocemos estadísticas de esta característica de nuestros municipios, aunque la base de datos municipal del *IGN* incluye la altitud de la capital del municipio. Comparando la altitud municipal media, derivada del modelo *SRTM*, con la altitud de la capital del municipio, proporcionada por el *IGN*, y que podemos tomar como aproximación de la altitud a la que vive la población, observamos que esta última se sitúa generalmente por debajo. En concreto, sólo en 2.067 municipios de los 8,108 existentes (el 25,5%) la altitud de la capital del municipio se sitúa por encima de la altitud promedio, pero de estos sólo en 151 (el 1,9%) la diferencia supera los 100 m. Ello constituye un indicador adicional de que la población tiende a preferir el valle al terreno montañoso.

Diversos autores (Reher 1986, 1994; Pons, López y Montoro 2004; Goerlich y Mas 2008a, 2008b, 2009) han estudiado los patrones de localización de la población en relación a determinados factores geográficos y de tipo político-administrativo, fundamentalmente la altitud, la proximidad a la costa y la condición de capital de la provincia. Todos ellos observan como en el siglo XX la distribución de la población muestra un patrón divergente, con una concentración creciente en el litoral y en las capitales de provincia, lo que en líneas generales parece continuar en la actualidad. En concreto, Goerlich y Mas (2009), utilizando datos censales (Goerlich, Mas, Azagra y Chorén 2006), indican que en 2001 el 31,7% de la población se localiza en municipios con acceso directo al mar<sup>30</sup>, el 52,8% lo hace en munic-

---

<sup>30</sup> Que representan un total de 460 municipios que constituyen lo que podríamos denominar la primera línea de costa, y que representan tan sólo un 7,0% de la superficie del país.

pios cuya capital se sitúa por debajo de los 200 m de altitud y el 34,1% lo hace en capitales de provincia; mientras que los porcentajes correspondientes en 1900 son el 21,0%, el 35,3% y el 17,3%, respectivamente.

Para examinar la relación entre heterogeneidad del terreno y distribución de la población a nivel municipal definimos 4 zonas de rugosidad, planicie: [0, 10], rugosidad baja, (10, 26], intermedia, (26, 41] y elevada, > 41; y examinamos la evolución de la población, el tamaño medio municipal y la dispersión, por medio del índice de Gini, dentro de cada tramo. Los resultados se ofrecen en el cuadro 4.

Al contrario de lo que sucede con la altitud (Goerlich y Mas 2009, tabla 5)<sup>31</sup>, la tabla 4 no muestra una polarización evidente entre zonas. Todos los intervalos incrementan la población, si bien no en igual magnitud; así, en términos relativos, la planicie y la zona de rugosidad baja ven incrementar su participación a costa de las zonas de mayor rugosidad. Es aquí donde el tamaño municipal medio es inferior al promedio nacional, pero de nuevo las diferencias no son tan acusadas como en el caso de la altitud. En este sentido llama la atención que la dispersión entre tamaños municipales, medida por índice de Gini, es muy similar entre todos los grupos y el conjunto nacional, de forma que los municipios no son más homogéneos en tamaños por intervalos de rugosidad. Además esta dispersión ha crecido de forma sostenida en todos los casos a lo largo del siglo XX. Así pues, la irregularidad del terreno parece jugar un papel mucho más moderado en el proceso de concentración de la población que otro tipo de características geográficas.

Una ecuación de  $\beta$ -convergencia, que relaciona el crecimiento promedio de la población,  $\log(Pob_{2001}) - \log(Pob_{1900})$ , con la población inicial,  $\log(Pob_{1900})$ , muestra síntomas claros de divergencia. Este resultado confirma la tendencia hacia la concentración de la población que se observa mediante el cálculo de índices de dispersión habituales (Goerlich y Mas 2008a), y muestra que los factores históricos juegan un papel fundamental en los procesos de asentamiento urbano. Condicionando por factores

---

<sup>31</sup> La altitud en este caso hace referencia a la altitud de la capital del municipio proporcionada por el IGN, no a la altitud media del término municipal.

CUADRO 4: Distribución de la población según la rugosidad del terreno. España 1900-2001

	Nivel de rugosidad	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1981	1991	2001
Población	Planicie: [0, 10]	3.026.119	3.270.829	3.547.388	3.905.998	4.432.717	4.811.866	5.177.964	5.921.550	7.119.221	7.614.882	8.184.908
	Baja: (10, 26]	7.397.550	8.036.852	8.886.532	9.980.185	11.190.085	12.210.519	13.816.236	15.854.427	17.472.226	17.990.235	18.847.481
	Intermedia: (26, 41]	4.136.747	4.444.490	4.696.123	4.972.887	5.315.863	5.509.442	5.745.983	6.057.733	6.630.912	6.848.571	7.254.090
	Elevada: (41, +∞)	4.270.233	4.608.135	4.882.620	5.167.501	5.448.189	5.640.441	6.036.752	6.207.772	6.459.996	6.418.580	6.560.892
	<b>España</b>	<b>18.830.649</b>	<b>20.360.306</b>	<b>22.012.663</b>	<b>24.026.571</b>	<b>26.386.854</b>	<b>28.172.268</b>	<b>30.776.935</b>	<b>34.041.482</b>	<b>37.682.355</b>	<b>38.872.268</b>	<b>40.847.371</b>
Porcentaje total de la población	Planicie: [0, 10]	16,1%	16,1%	16,1%	16,3%	16,8%	17,1%	16,8%	17,4%	18,9%	19,6%	20,0%
	Baja: (10, 26]	39,3%	39,5%	40,4%	41,5%	42,4%	43,3%	44,9%	46,6%	46,4%	46,3%	46,1%
	Intermedia: (26, 41]	22,0%	21,8%	21,3%	20,7%	20,1%	19,6%	18,7%	17,8%	17,6%	17,6%	17,8%
	Elevada: (41, +∞)	22,7%	22,6%	22,2%	21,5%	20,6%	20,0%	19,6%	18,2%	17,1%	16,5%	16,1%
Tamaño medio	Planicie: [0, 10]	1.913	2.068	2.242	2.469	2.802	3.042	3.273	3.743	4.500	4.813	5.174
	Baja: (10, 26]	2.575	2.797	3.093	3.474	3.895	4.250	4.809	5.518	6.082	6.262	6.560
	Intermedia: (26, 41]	2.488	2.673	2.824	2.990	3.197	3.313	3.455	3.643	3.987	4.118	4.362
	Elevada: (41, +∞)	2.146	2.316	2.454	2.597	2.738	2.834	3.034	3.119	3.246	3.225	3.297
	<b>España</b>	<b>2.322</b>	<b>2.511</b>	<b>2.715</b>	<b>2.963</b>	<b>3.254</b>	<b>3.475</b>	<b>3.796</b>	<b>4.199</b>	<b>4.648</b>	<b>4.794</b>	<b>5.038</b>
España = 100	Planicie: [0, 10]	82,4	82,3	82,6	83,3	86,1	87,5	86,2	89,2	96,8	100,4	102,7
	Baja: (10, 26]	110,9	111,4	113,9	117,2	119,7	122,3	126,7	131,4	130,9	130,6	130,2
	Intermedia: (26, 41]	107,1	106,4	104,0	100,9	98,2	95,3	91,0	86,8	85,8	85,9	86,6
	Elevada: (41, +∞)	92,4	92,2	90,4	87,6	84,1	81,6	79,9	74,3	69,8	67,3	65,4
Gini	Planicie: [0, 10]	0,633	0,634	0,652	0,666	0,691	0,705	0,726	0,789	0,839	0,852	0,858
	Baja: (10, 26]	0,690	0,694	0,714	0,733	0,755	0,772	0,805	0,858	0,885	0,891	0,892
	Intermedia: (26, 41]	0,609	0,614	0,624	0,634	0,654	0,668	0,692	0,750	0,796	0,811	0,818
	Elevada: (41, +∞)	0,563	0,576	0,593	0,613	0,636	0,658	0,695	0,751	0,797	0,810	0,818
	<b>España</b>	<b>0,637</b>	<b>0,643</b>	<b>0,660</b>	<b>0,678</b>	<b>0,701</b>	<b>0,719</b>	<b>0,750</b>	<b>0,808</b>	<b>0,846</b>	<b>0,857</b>	<b>0,862</b>

Nota: Las 4 zonas de rugosidad se definen en el texto, y corresponden al modelo SRTM. El valor mínimo se muestra en azul. El valor máximo se muestra en rojo.

geográficos, altitud y litoralidad, y político-administrativos, la condición de capital de provincia, Goerlich y Mas (2009) muestran como la tendencia a la divergencia disminuye notablemente, aunque no se elimina. Además, todos estos factores resultan altamente significativos en relación al crecimiento de la población municipal, la capacidad explicativa de la ecuación aumenta de forma significativa y la magnitud y signo de los coeficientes están de acuerdo con lo esperado. A efectos de comparación reproducimos la ecuación de  $\beta$ -convergencia condicionada de Goerlich y Mas (2009, ecuación (7)),

$$\begin{aligned} \log(Pob_{2001}) - \log(Pob_{1900}) = & \sum_{j=1}^{52} \hat{\alpha}_j P_j + 0.0715 \log(Pob_{1900}) + \\ & (0.0288) \\ & 0.4305L + \\ & (0.1072) \\ & 1.5698A_1 + 0.8256A_2 + 0.3997A_3 + \\ & (0.1776) \quad (0.1066) \quad (0.0903) \quad (8) \\ & 1.1708C + \hat{u} \\ & (0.1706) \end{aligned}$$

$$R^2 = 0.494 \quad n = 8,108$$

donde  $L_i$  es una variable ficticia que toma el valor uno si el municipio  $i$  tiene salida al mar y cero en caso contrario;  $A_{ji}$  son variables ficticias que toman el valor uno si la capital del municipio  $i$  tiene una altitud igual o inferior a los 200 m para  $j = 1$ , entre los 200 m y los 600 m, para  $j = 2$ , y entre los 600 y los 1.000 m para  $j = 3$ , y cero en caso contrario;  $C_i$  es una variable ficticia que toma el valor uno si el municipio  $i$  es capital de provincia y cero en caso contrario; y finalmente  $P_{ji}$  son variables *dummy* que toman el valor 1 si el municipio  $i$  pertenece a la provincia  $j = 1, 2, \dots, 52$ , y cero en caso contrario, y que se introducen para captar comportamientos heterogéneos en las diferentes provincias. La ecuación se estima por mínimos cuadrados ordinarios y

entre paréntesis figuran errores estándares consistentes frente a heteroscedasticidad y correlación espacial utilizando la provincia como *cluster*.

Cuando añadimos 3 variables ficticias indicativas del grado de rugosidad, de acuerdo con la clasificación de la tabla 4, obtenemos que, aunque la magnitud de la condición inicial permanece inalterada, dichas variables son significativas y muestran el signo correcto,

$$\begin{aligned} \log(Pob_{2001}) - \log(Pob_{1900}) = & \sum_{j=1}^{52} \hat{\alpha}_j P_j + 0.0800 \log(Pob_{1900}) + \\ & (0.0293) \\ & 0.4209L + \\ & (0.1076) \\ & 1.1739A_1 + 0.5603A_2 + 0.2444A_3 + \\ & (0.1860) \quad (0.1005) \quad (0.0854) \\ & 0.7004R_1 + 0.4452R_2 + 0.2185R_3 + \\ & (0.0828) \quad (0.0648) \quad (0.0486) \\ & 1.1018C + \hat{u} \\ & (0.1647) \end{aligned} \tag{9}$$

$$R^2 = 0.524 \quad n = 8,108$$

donde  $R_{ji}$  son variables ficticias que toman el valor uno si el índice de rugosidad toma un valor entre 0 y 10 para  $j = 1$ , entre 10 y 26 para  $j = 2$ , y entre 26 y 41 para  $j = 3$ , y cero en caso contrario.

Lo que la ecuación (9) indica es que, controlando por la altitud, la rugosidad del terreno constituye un factor explicativo en el crecimiento promedio de la población municipal, mostrando una correlación parcial negativa. Por una parte el  $R^2$  se incrementa ligeramente y por otra las variables  $R_j$  resultan altamente significativas, todo ello sin restar significatividad al resto de variables ni alterar su magnitud de forma considerable. Desde el punto de vista de la magnitud de los coeficientes, tan sólo los coeficientes de la altitud muestran una reducción de cierta importancia, aun-

que manteniendo su jerarquía; la misma jerarquía que es observada para la rugosidad, de forma que, *ceteris paribus*, la población parece preferir un terreno suave a uno abrupto.

## 7. Discusión

ESTE trabajo ha examinado una característica de nuestra geografía que no parece haber recibido ninguna atención en España por parte de los estudios de geografía, la rugosidad del terreno. Los recientes *sistemas de información geográfica (GIS)* pueden ser utilizados para la elaboración de índices de rugosidad o “montañosidad” de un territorio a partir de *modelos de elevación digital (DEM)* y que pueden ser de aplicación en diversos ámbitos.

Partiendo de dos *DEM* de acceso público y cobertura mundial, el *GTOPO30* y el *SRTM*, hemos calculado el índice de rugosidad de Riley, DeGloria y Elliot (1999). La comparación de modelos permitió detectar algunas anomalías en el modelo *GTOPO30* para la zona de las Islas Canarias. Este hecho, unido a su menor precisión, altimétrica y planimétrica, frente al *SRTM*, y al hecho de que el objetivo último de este trabajo es la elaboración de índices que cuantifiquen la heterogeneidad topográfica a escala municipal nos hizo decantarnos por el *SRTM* como modelo de altitudes de referencia. Adicionalmente, dado el menor tamaño de celda, el modelo *SRTM* parece especialmente adecuado para captar topografías de diente de sierra o quebradas de forma continuada.

La comparación del *DEM* de partida con el *modelo digital del terreno (DTM)* de rugosidades proporcionó algunos resultados de interés en el ámbito de la descripción del paisaje. Altitud y rugosidad son dos características poco correlacionadas. Aunque hay zonas muy elevadas que muestran rugosidades por encima del promedio, existen amplias zonas de la península con una altitud considerable, pero que pre-

sentan una topografía particularmente plana; por el contrario, numerosas zonas de baja cota muestran topografías altamente rugosas o quebradas.

Estas características son particularmente evidentes cuando comparamos valores medios provinciales. Las provincias más rugosas, Oviedo y Guipúzcoa, no muestran altitudes particularmente elevadas, mientras que muchas de las provincias que exceden los 1.000 m de altitud promedio muestran índices de rugosidad moderados o bajos.

En el terreno de las aplicaciones una extensión sencilla de algunos de los resultados en Goerlich y Mas (2009) indican que la rugosidad es un factor condicionante explicativo de la concentración de la población a lo largo del último siglo, y ello sin mermar capacidad explicativa al resto de factores geográficos y político-administrativos normalmente considerados en este tipo de ejercicios.

La conclusión es pues que el índice de rugosidad calculado resume una característica útil del paisaje, como pueden ser la altitud, la longitud de costa o su proximidad a ella. Además, la disponibilidad del *DTM* de rugosidades permite el cálculo de valores promedio para el índice a cualquier nivel de agregación geográfica que se desee.

## 8. Bibliografía

ACEMOGLU, D., S. JOHNSON y J.A. ROBINSON (2001): “The colonial origins of comparative development: An empirical investigation”. *American Economic Review* 91, 5, 1369-1401.

\_\_\_\_ (2002): “Reversal of fortune: Geography and institutions in the making of the modern world income distribution”. *Quarterly Journal of Economics* 117, 4, 1231-1294.

AGUILAR TORRES, F.J., M.A. AGUILAR TORRES, F. AGÜERA VEGA, F. CARVAJAL RAMÍREZ y P.L. SÁNCHEZ SALMERÓN (2002): “Efectos de la morfología del terreno, densidad muestral y

- métodos interpolación en la calidad de los modelos digitales de elevaciones”. *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Santander, 5-7 de junio de 2002.
- ANDERSON, J., y E. VAN WINCOOP, (2003): “Gravity and gravitas: A solution to the border puzzle”. *American Economic Review* 93, 1,170-192.
- ANDERSON, M., y S. SMITH (1999): “Do national borders really matter? Canada-US regional trade reconsidered”. *Review of International Economics* 72, 2, 219-227.
- BEASOM, S. L., E. P. WIGGERS y R. J. GIORDONO (1983): “A technique for assessing land surface ruggedness”. *Journal of Wildlife Management* 47, 1163-1166.
- BISSONETTE, J. A. (1997): *Wildlife and landscape ecology: Effects of pattern and scale*. Nueva York: Springer.
- BUHAUG, H. (2005): “The Geography of Armed Civil Conflict”. Tesis doctoral, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- BURCHFIELD, M., H.G. OVERMAN, D. PUGA y M.A. TURNER (2006): “Causes of sprawl: A portrait from space”. *Quarterly Journal of Economics* 121, 2, 587-633.
- CRAWFORD, M.A. (2008): “An Analysis of Terrain Roughness: Generating a GIS Application for Prescribed Burning”. Tesis *Master of Science*, Texas Tech University.
- COLLIER, P., y A. HOEFFLER (2004): “Greed and grievance in civil war”. *Oxford Economic Paper* 56, 4, 563-595.
- COMBES, P.P., y M. LAFOURCADE (2005): “Transport costs: Measures, determinants, and regional policy implications for France”. *Journal of Economic Geography* 5, 3, 319-349.
- CONLEY, T.G. (1999): “GMM estimations with cross sectional dependence”. *Journal of Econometrics* 92, 1-45.
- DOBADO GONZÁLEZ, R. (2004): “Un legado peculiar: La geografía”. En E. Llopis, ed. *El Legado Económico del Antiguo Régimen en España*, capítulo 3, Barcelona: Ed. Crítica, 97-119.

- ENGERMAN, S.L., y K.L. SOKOLOFF (2002): “Factor endowments, inequality, and paths of development among new world economies”. Documento de Trabajo n.º 9259, Cambridge (MA): National Bureau of Economic Research, octubre.
- ESRI (2002): *Using ArcGIS Spatial Analyst. GIS by ESRI*. Redlands (CA), Estados Unidos.
- FUJITA, M., P. KRUGMAN y A.J. VENABLES (1999): *The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade*. Cambridge (MA): MIT Press.
- GALLUP, J. L., y J.D. SACHS (2001): “The economic burden of malaria”. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 64, 1-2, 85-96.
- GERRARD, A.J. (2000): “What is a mountain?”. Mimeo, The World Bank Development Research Group.
- GIONFRIDDO, J.P., y P. R. KRAUSMAN (1986): “Summer habitat use by mountain sheep”. *Journal of Wildlife Management* 50, 331-336.
- GOERLICH, F.J., M. MAS, J. AZAGRA y P. CHORÉN (2006): *La localización de la población española sobre el territorio. Un siglo de cambios. Un estudio basado en series homogéneas (1900-2001)*. Bilbao: Fundación BBVA.
- GOERLICH, F.J., y M. MAS (2008a): “Algunas pautas de localización de la población española a lo largo del siglo XX”. *Investigaciones Regionales* 12, 5-33.
- \_\_\_\_ (2008b): “Empirical evidence of population concentration in Spain”. *Population-E* 63, 4, 635-650.
- \_\_\_\_ (2009): “Drivers of agglomeration: Geography versus History”. *The Open Urban Studies Journal* 2, 28-42. Disponible en Internet: <http://www.bentham.org/open/tousj/openaccess2.htm>.
- GOERLICH, F.J., y A. VILLAR (2009): *Desigualdad y bienestar Social: De la Teoría a la práctica*. Bilbao: Fundación BBVA.
- HANSEN, L.P. (1982): “Large sample properties of generalized method of moment estimators”, *Econometrica* 50, 4, 1029-1054.

- HEAD, K., y T. MAYER (2002): “Illusory border effects: Distance mismeasurement inflates estimates of home bias in trade”. Documento de Trabajo n.º 2002-01, París: CEPII.
- HOBSON, R.D. (1972): “Surface roughness in topography: Quantitative approach”. En R.J. Chorley, ed. *Spatial Analysis in Geomorphology*, capítulo 8, Nueva York: Harper & Row, 221-245.
- JENNESS, J.S. (2004): “Calculating landscape surface area from digital elevation models”, *Wildlife Society Bulletin* 32, 3, 829-839.
- KRUGMAN, P. (1991): *Geography and Trade*. Leuven y Cambridge (MA): Leuven University Press y The MIT Press.
- MARCON, E., y F. PUECH (2003): “Evaluating the geographic concentration of industries using distance-based methods”. *Journal of Economic Geography* 3, 4, 409-428.
- MAGNUS, J.R., y H. NEUDECKER (1988): *Matrix Differential Calculus. With Applications in Statistics and Econometrics*, Nueva York: John Wiley & Sons.
- MCCALLUM, J. (1995): “National borders matter: Canada-US regional trade patterns”. *American Economic Review* 85, 3, 615-623.
- MCCANN, P. (2005): “Transport costs and the new economic geography”. *Journal of Economic Geography* 5, 305-318.
- MELLINGER, A., J.D. SACHS y J. GALLUP (2000): “Climate, coastal proximity, and development”. En G.L. Clark, M.P. Feldman y M.S. Gertler, eds. *Oxford Handbook of Economic Geography*, Oxford: Oxford University Press, 169-194.
- NADAL, J., dir. (2003): *Atlas de la Industrialización de España, 1975-2000*. Bilbao: Fundación BBVA y Editorial Crítica.
- NUNN, N., y D. PUGA (2009): “Ruggeness: The blessing of bad geography in Africa”. Documento de Trabajo n.º 14918, Cambridge (MA): National Bureau of Economic Research, abril.
- OVERMAN, H. (2009): “‘GIS a job’: What use Geographical Information Systems in Spatial Economics?”. Conferencia del 50.º Aniversario de la revista *Journal of Regional*

*Science*, organizado por la Federal Reserve Bank of New York, abril 2009. Disponible en Internet: [http://www.newyorkfed.org/research/conference/2009/jrs\\_agenda.html](http://www.newyorkfed.org/research/conference/2009/jrs_agenda.html).

POLIDORI, L.J., J. CHOROWICZ y R. GUILLANDE (1991): “Description of terrain as a fractal surface, and application to digital elevation model quality assessment”. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57, 1329-1332.

PONS IZQUIERDO, J.J., D. LÓPEZ y C. MONTORO GURICH (2004): “Del interior a la costa: Dinámica espacial de la población española a lo largo del siglo XX”. VII Congreso de la Asociación de Demografía Histórica, Granada, 1-3 de abril de 2004.

RAPPAPORT, J., y J.D. SACHS (2003): “The United States as a coastal nation”. *Journal of Economic Growth* 8, 1, 5-46.

REHER, D.S. (1986): “Desarrollo urbano y evolución de la población: España 1787-1930”. *Revista de Historia Económica* 4, 1, 39-66.

\_\_\_\_ (1994): “Ciudades, procesos de urbanización y sistemas urbanos en la Península Ibérica, 1550–1991”. En M. Guardia, F.J. Monclús y J.L. Oyón, dirs. *Atlas histórico de ciudades europeas*. Barcelona: Centre de Cultura Contemporània de Barcelona.

RILEY, S.J., S.D. DEGLORIA y R. ELLIOT (1999): “A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity”. *Intermountain Journal of Sciences* 5, 1-4, 23-27.

SACHS, J.D. (2001): “The geography of poverty and wealth”. *Scientific American*, 70-75.

SACHS, J.D., y P. MALANEY (2001): “The economic and social burden of malaria”. *European Economic Review* 45, 4-6, 827-838.

SACHS, J.D., y A.M. WARNER (2001): “The curse of natural resources”. *Nature* 415, 6872, 680-685.

SAMUELSON, P. (1952): “The transfer problem and transport costs: the terms of trade when impediments are absent”. *The Economic Journal* 62, 278-304

- SAPPINGTON, J.M., K.M. LONGSHORE y D.B. THOMPSON, (2007): “Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: A case study using bighorn sheep in the Mojave desert”. *The Journal of Wildlife Management* 71, 5, 1419-1426.
- SOKOLOFF, K.L., y S.L. ENGERMAN (2000): “History lessons: Institutions, factor endowments, and paths of development in the new world”. *Journal of Economic Perspectives* 14, 3, 217-232.
- STEELE, J.M. (2004): *The Cauchy-Schwarz Master Class. An Introduction to the Art of Mathematical Inequalities*. Cambridge: Cambridge University Press.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (1996): *GTOPO30*. Sioux Falls (SD): United States Geological Survey Center for Earth Resources Observation and Science (EROS).
- WHITE, H.A. (1980): “A heteroskedasticity-consistent covariance matrix and a direct test for heteroskedasticity”. *Econometrica* 48, 4, 721-746.
- WIGGERS, E.P., y S.L. BEASOM (1986): “Characterization of sympatric or adjacent habitats of 2 deer species in West Texas”. *Journal of Wildlife Management* 50, 129-134.
- WOOLDRIDGE, J.M. (2003): *Introductory Econometrics. A Modern Approach*. 2.<sup>a</sup> edición, Thomson-South Western College Publishing.
- WONG, D.W.S., y J. LEE (2005): *Statistical Analysis of Geographic Information with ArcView GIS<sup>®</sup> and ArcGIS<sup>®</sup>*. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc.

**NOTA SOBRE LOS AUTORES - ABOUT THE AUTHORS\***

**ISIDRO CANTARINO MARTÍ** es doctor ingeniero agrónomo por la Universidad Politécnica de Valencia y profesor titular del Departamento de Ingeniería del Terreno de la citada Universidad. Ha realizado trabajos profesionales y de investigación en la determinación y gestión de recursos hidráulicos con aplicación en ámbitos montañosos, promovidos por la Dirección General de Obras Hidráulicas. En la actualidad se encuentra colaborando con la Consellería de Cultura, Educación y Deportes para implementar un Sistema de Información Geográfica que gestione la localización y clasificación patrimonial de yacimientos paleontológicos, así como cartografías temáticas asociadas.

Correo electrónico: [icantari@trr.upv.es](mailto:icantari@trr.upv.es)

**FRANCISCO J. GOERLICH GISBERT** es licenciado en Ciencias Económicas por la Universidad de Valencia, máster en Económicas por la London School of Economics, doctor por la Universidad de Valencia, catedrático del Departamento de Análisis Económico en la Universidad de Valencia y profesor investigador del Ivie. Coautor de más de diez libros, ha publicado medio centenar de artículos sobre temas de macroeconomía, econometría y economía regional en diversas revistas nacionales e internacionales, tales como *Investigaciones Económicas*, *Revista Española de Economía*, *Revista de Economía Aplicada*, *Investigaciones Regionales*, *Estadística Española*, *Review of Income and Wealth*, *Regional Studies*, *Journal of Regional Science*, *Applied Economics*, *Population, Economics Letters* o *Econometric Theory*.

Correo electrónico: [Francisco.J.Goerlich@uv.es](mailto:Francisco.J.Goerlich@uv.es)

---

Cualquier comentario sobre este documento puede ser enviado a Francisco J. Goerlich Gisbert, Universidad de Valencia, Departamento de Análisis Económico, Campus de Tarongers, Av de Tarongers s/n, 46022-Valencia. E-mail: [Francisco.J.Goerlich@uv.es](mailto:Francisco.J.Goerlich@uv.es)

\* Los autores agradecen una ayuda del Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas (Ivie) para la realización de este trabajo. Francisco J. Goerlich agradece la ayuda del proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología SEC2008-03813/ECON y del programa de investigación Fundación BBVA-Ivie. Resultados mencionados en el texto pero no ofrecidos están disponibles si se solicitan a los autores.

**ÚLTIMOS NÚMEROS PUBLICADOS – RECENT PAPERS**

- DT 06/10 *Quality of Education and Equality of Opportunity in Spain: Lessons from Pisa*  
Aitor Calo-Blanco y Antonio Villar Notario
- DT 05/10 *Breaking the Floor of the SF-6D Utility Function: An Application to Spanish Data*  
José M.<sup>a</sup> Abellán Perpiñán, Fernando I. Sánchez Martínez, Jorge E. Martínez Pérez e Ildefonso Méndez Martínez
- DT 04/10 *Análisis del potencial socioeconómico de municipios rurales con métodos no paramétricos: aplicación al caso de una zona Leader*  
Ernest Reig Martínez
- DT 03/10 *Corpus lingüístico de definiciones de categorías semánticas de personas mayores sanas y con la enfermedad de Alzheimer: una investigación transcultural hispano-argentina*  
Herminia Peraita Adrados y Lina Grasso
- DT 02/10 *Financial Crisis, Financial Integration and Economic Growth: The European Case*  
Juan Fernández de Guevara Radoselovics y Joaquín Maudos Villarroya
- DT 01/10 *A Simple and Efficient (Parametric Conditional) Test for the Pareto Law*  
Francisco J. Goerlich Gisbert
- DT 16/09 *The Distance Puzzle Revisited: A New Interpretation Based on Geographic Neutrality*  
Iván Arribas Fernández, Francisco Pérez García y Emili Tortosa-Ausina
- DT 15/09 *The Determinants of International Financial Integration Revisited: The Role of Networks and Geographic Neutrality*  
Iván Arribas Fernández, Francisco Pérez García y Emili Tortosa-Ausina
- DT 14/09 *European Integration and Inequality among Countries: A Lifecycle Income Analysis*  
José Manuel Pastor Monsálvez y Lorenzo Serrano Martínez
- DT 13/09 *Education, Utilitarianism and Equality of Opportunity*  
Aitor Calo-Blanco y Antonio Villar Notario
- DT 12/09 *Competing Technologies for Payments: Automated Teller Machines (ATMs), Point of Sale (POS) Terminals and the Demand for Currency*  
Santiago Carbó-Valverde y Francisco Rodríguez-Fernández
- DT 11/09 *Time, Quality and Growth*  
Francisco Alcalá

## Fundación **BBVA**

---

Plaza de San Nicolás, 4  
48005 Bilbao  
España  
Tel.: +34 94 487 52 52  
Fax: +34 94 424 46 21

Paseo de Recoletos, 10  
28001 Madrid  
España  
Tel.: +34 91 374 54 00  
Fax: +34 91 374 85 22  
[publicaciones@bbva.es](mailto:publicaciones@bbva.es)  
[www.bbva.es](http://www.bbva.es)