



Proyecto Fin de Carrera "Generalización de Elementos Lineales mediante Algoritmos en el Dominio Espacial y de la Frecuencia"

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento de una serie de algoritmos de generalización sobre una muestra de líneas del MTN25 (Fig. 1), combinando técnicas espaciales y frecuenciales. Se pretende analizar los resultados de una forma objetiva, tratando de **cuantificar la bondad que cada algoritmo presenta para el propósito de la generalización**. Para aumentar la utilidad y significación de los resultados obtenidos, la muestra de líneas es diversa en cuanto a complejidad, sinuosidad y homogeneidad.

Autor: José Luis García Balboa (jlgbalboa@ujaen.es), Ingeniero en Geodesia y Cartografía, Ingeniero Técnico en Topografía. Universidad de Jaén. Este proyecto se encuentra en la biblioteca de la Universidad de Jaén.

INTRODUCCIÓN

La generalización tal vez sea el proceso cartográfico más complejo al que deba enfrentarse el cartógrafo. La [NCGIA](#) (1989) la define de forma simple como "un grupo de técnicas que permiten mantener la cantidad de información presente en un mapa a pesar de reducir la cantidad de datos".

Es en estos últimos años cuando más interés está tomando esta línea de trabajo, cuando cada vez es mayor la importancia, en distintos ámbitos de nuestra sociedad, de los sistemas cartográficos digitales y sobre todo de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.). El cartógrafo se sirve de la generalización para enfatizar lo esencial y suprimir lo superfluo, reducir la complejidad del mapa en el proceso de reducción de escala, mantener las relaciones lógicas e inequívocas entre los elementos representados y para preservar la calidad estética, tratando siempre de **favorecer la claridad y la comunicación de la información**.

Uno de los aspectos negativos de la generalización tradicional o manual que se pretende **eliminar** con la generalización digital o automatizada es la enorme **subjetividad** que conlleva. Esta subjetividad viene motivada por la ausencia de unas reglas de generalización "universales", siendo la formación cartográfica de cada operador diferente. Incluso una línea puede aparecer como diferente habiendo sido la misma persona la que ha operado sobre ella, debido a la ausencia de repetitividad. En cambio, el proceso digital ofrecerá siempre el mismo resultado si los datos y parámetros de partida son los mismos, ya que la secuencia de operaciones será siempre la misma. Ahora bien, será necesario incorporar ese conocimiento cartográfico y geográfico que permite la generalización manual en el contexto digital, constituyendo uno de los mayores problemas que se presentan por ahora.

Asimismo, una de las fundamentales ventajas de la generalización automatizada es la creación de **bases de datos independientes de la escala**. En la actualidad se elabora una base de datos distinta para cada versión de un mismo mapa a distinta escala debido a que los datos procedentes de un mapa a escala mayor son excesivos o a que su propósito es diferente. Esto ocasiona una fuerte pérdida de tiempo y dinero, sobre todo a la hora de proceder a la actualización de los datos, que la sociedad demanda cada vez con mayor rapidez. Una base de datos independiente de la escala ofrece la posibilidad de almacenar una única base de datos con todos los datos necesarios para la elaboración mapas con distinta escala o de temática diferente. Para la elaboración de cada uno de ellos se recurrirá a distintas herramientas de generalización y filtrado, siempre que el resultado sea de calidad.

Por tanto, la actualidad e interés del tema justifica claramente el presente proyecto. Se pretende investigar en el proceso automatizado de la generalización, utilizando **diversas técnicas, tanto en el dominio espacial como en el de la frecuencia**, evaluando los resultados objetivamente a través de una serie de medidas evaluadoras, además de visualmente sobre el papel.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento de una serie de algoritmos de generalización sobre una muestra de líneas del MTN25 (Fig. 1), combinando técnicas

espaciales y frecuenciales. Se pretende analizar los resultados de una forma objetiva, tratando de **cuantificar la bondad que cada algoritmo presenta para el propósito de la generalización**. Para aumentar la utilidad y significación de los resultados obtenidos, la muestra de líneas es diversa en cuanto a complejidad, sinuosidad y homogeneidad.

Queremos indagar en el **proceso de reducción de escala**, es decir, en cómo aprovechar la información contenida en la escala mayor para elaborar una cartografía a escala menor sin necesidad de repetir los pasos de adquisición de información, digitalización, simbolización, etc. En concreto vamos a aplicar la generalización a elementos lineales a la escala 1:25.000 para derivarlos a la escala 1:50.000 mediante la implementación de distintos algoritmos. Este cambio de escala tiene una gran importancia hoy en día, ya que es el existente entre las dos grandes series cartográficas del Instituto Geográfico Nacional, y que permitiría obtener automáticamente la serie del MTN50, muy anticuada, a partir de la reciente del MTN25.

En esencia estamos refiriéndonos al concepto de base de datos independiente de la escala, a partir de la cual se irían elaborando mapas a distintas escalas aplicando el proceso de generalización, necesario para evitar que se den fenómenos de colisión, colapso, congestión, imperceptibilidad y todo aquel que dificulte la comprensión o perjudique la claridad o calidad estética.

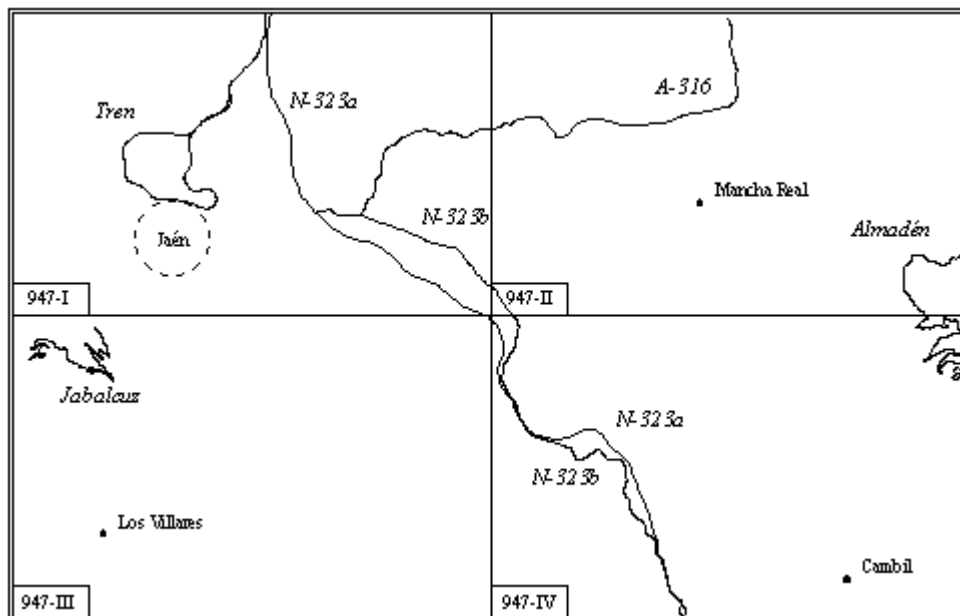


Figura 1. Muestra de líneas utilizada de las hojas 947 del MTN25

GENERALIZACIÓN EN EL DOMINIO ESPACIAL

Consideraremos que un algoritmo trabaja en el dominio espacial cuando los **parámetros y operadores** que maneja para efectuar la generalización tienen un **claro carácter geométrico**: coordenadas cartesianas, distancias, ángulos, áreas, cambios de escala, traslaciones o giros, por ejemplo. Pertenecen a este tipo la gran mayoría de algoritmos de generalización, ya que, a priori, una línea es un elemento espacial, y sólo ha sido recientemente cuando algunos autores han reflexionado sobre la posibilidad de ensayar representaciones frecuenciales.

Algoritmos de Douglas-Peucker y Visvalingam

El **algoritmo de Douglas-Peucker** (1973) es el algoritmo de generalización de líneas más utilizado. Es el único presente en programas comerciales de cartografía digital y S.I.G. como System9 o ArcInfo, además de estar siendo empleado por instituciones cartográficas para

disminuir el tamaño de sus bases de datos digitales. Ha sido estudiado, comparado y analizado a fondo por muchos, por no decir todos, los que trabajan en generalización, con unos resultados casi siempre alabados, ya que se acercan, más que los de ningún otro, al producto de una generalización manual. Podemos decir que es el algoritmo "a batir" o la referencia establecida para evaluar los resultados de los nuevos algoritmos que van saliendo a la luz.

Precisamente se ha decidido incluirlo porque hasta la fecha es la mejor referencia para evaluar los resultados que proporcionan el resto de algoritmos.

Se fundamenta en la **búsqueda de puntos críticos** (Fig. 2). Los puntos críticos, que constituirán la línea simplificada, serán los que vayan teniendo una distancia perpendicular mayor respecto a la línea base considerada. La primera línea base quedará constituida entre el primer y último punto de la línea original. Acto seguido se calcularán las distancias perpendiculares de todos los puntos intermedios. Si ninguna de estas distancias es mayor a la tolerancia la simplificación habrá finalizado y sólo quedarán retenidos los puntos inicial y final de la línea. En el caso de que sí se supere la tolerancia el punto con mayor distancia será retenido como punto crítico que subdividirá la línea original en dos secciones, en cada una de las cuales se repetirá el proceso como si de dos líneas independientes se tratase, y así sucesivamente hasta que no haga falta efectuar subdivisión alguna de la línea.

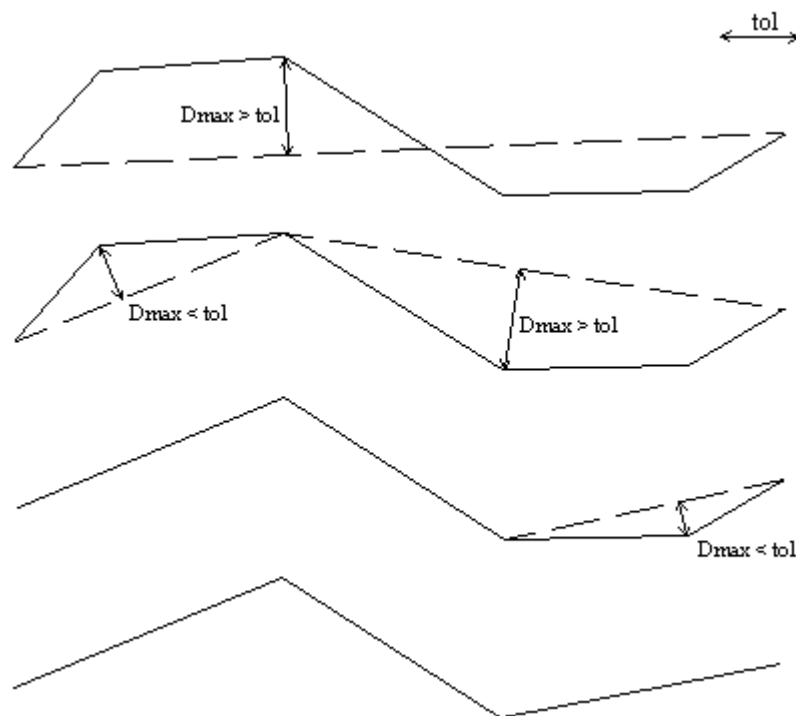


Figura 2. Ejemplo del funcionamiento del algoritmo de Douglas-Peucker

El mayor problema que presenta este algoritmo es que, como la mayoría, no puede emplearse para grandes cambios de escala ya que el resultado no es satisfactorio. Por el contrario, si el cambio es más modesto, la técnica de Douglas se revela como la óptima para la simplificación de líneas. Reinoso (1998) refirió que el algoritmo de Douglas-Peucker es el que mejor mantiene las propiedades posicionales de una línea en la generalización entre las escalas 1:25.000 y 1: 50.000.

El **algoritmo de Visvalingam** (1993) es muy reciente y fue ideado tratando de elaborar una rutina que se adaptara mejor a mayores reducciones de escala que la de Douglas-Peucker.

Se sirve del **concepto de área efectiva**, definida como el área del triángulo de cada punto de la línea respecto a sus dos vecinos, y que viene a significar el desplazamiento que sufriría la

línea en el caso de eliminar ese punto. El algoritmo, relativamente reciente, consiste en ir realizando sucesivas pasadas por la línea, en cada una de las cuales se eliminará el punto con menor área efectiva si es que es inferior a la tolerancia fijada (Fig. 3).

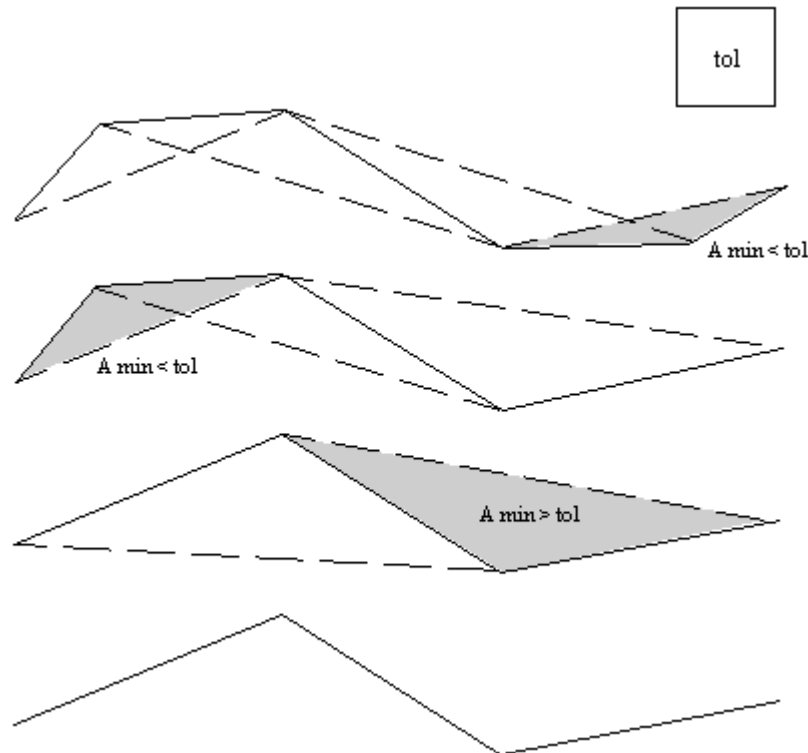


Figura 3. Ejemplo del funcionamiento del algoritmo de Visvalingam

Según Visvalingam y Whyhatt (1990,1991) la elección del punto crítico en el algoritmo de Douglas-Peucker, tal y como está formulada, puede recaer en picos debidos a un error o en pequeños detalles de la línea. Esto es contrario a la esencia de la generalización manual que intenta seleccionar las figuras más importantes de la línea y, sobre todo, es la causa de que el algoritmo no sea apropiado para importantes cambios de escala. Aunque, según sus autores, se comporta muy bien en el proceso de generalización, eliminando progresivamente detalles de la línea que están relacionados con la escala, según aumenta el grado de generalización, hemos decidido introducirla en nuestro trabajo porque sólo han sido sus autores los que han hecho referencia a la misma, por lo que queremos verificar cuál es su bondad generalizadora.

Aproximación matemática con arcos cúbicos

Cuando digitalizamos una línea obtenemos irremediabilmente una serie de puntos que forman una polilínea. Esta polilínea es una aproximación por segmentos o polinomios de primer grado a las curvas originales, que serían los objetos reales del terreno. Esto obliga a que se utilicen un gran número de puntos si queremos que la aproximación sea fiel. Si se utilizan **funciones de grado superior al lineal**, aunque las curvas que se obtienen siguen siendo una aproximación, necesitan **menos almacenamiento**, son **más compactas** y permiten una manipulación interactiva más fácil que las funciones lineales (Feito et al., 1995).

Con el empleo de arcos cúbicos, el objetivo es representar la línea mediante un conjunto de funciones algebraicas consecutivas, cada una de las cuales estará definida en un sistema local. Affholder (1993) propone la función $y = ax^3$, ya que se trata de una función simple que además se ajusta localmente a la clotoide (Fig. 4). Por tanto, esta técnica está pensada para ser aplicada sobre **vías de comunicación**, ya que otros tipos de elementos lineales, como líneas de costa o cursos fluviales, a menudo presentan un alto grado de complejidad e incluso

tendencias fractales. En cambio, las vías de comunicación suelen estar formadas por una concatenación de líneas rectas, arcos de circunferencia y arcos de clotoide.

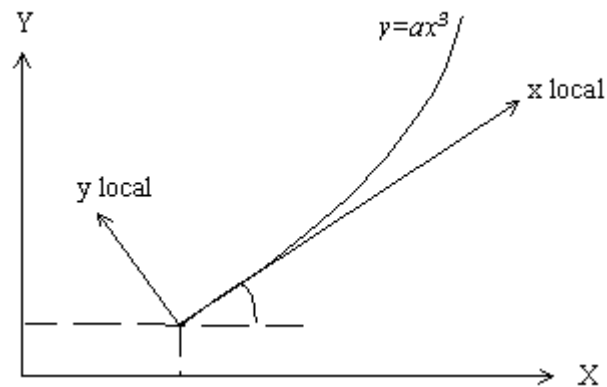


Figura 4. Función $y = ax^3$ en el sistema local

El proceso consistirá en ajustar una pareja de arcos cúbicos de concavidades opuestas entre cada dos puntos característicos consecutivos, que podrán consistir, por ejemplo, en puntos de inflexión o en puntos con un fuerte cambio de dirección. Por tanto los pasos a efectuar serán los siguientes:

- Suavizado previo mediante un **filtro gaussiano**, para eliminar las posibles microinflexiones de la línea. Este filtrado es el que determinará el número de puntos de inflexión, y por tanto el nivel de generalización.
- A partir de la línea suavizada, obtención de todos los **puntos de inflexión** sobre la línea original mediante la observación de la variación del producto vectorial. Es decir, si se observa un punto de inflexión sobre la línea suavizada se procede a la extracción de sus coordenadas como punto intermedio del segmento correspondiente de la línea original.
- Ajuste, entre cada dos puntos de inflexión consecutivos, de una **pareja de arcos cúbicos** de la forma $y = ax^3$ en un sistema de coordenadas local. Ambos arcos confluyen en un vértice intermedio de la línea original, que es aquel que **minimiza el área** entre ésta y los nuevos arcos.

GENERALIZACIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

En el dominio de la frecuencia la línea queda representada por un conjunto de coeficientes, cada uno de los cuales designa una determinada frecuencia espacial. Los coeficientes de baja frecuencia representan las formas y tendencias generales de la línea, mientras los de alta frecuencia lo hacen con los pequeños detalles. En todo proceso de generalización el objetivo es retener lo general para eliminar lo particular. Así, el uso de las representaciones frecuenciales queda justificado, ya que la **generalización se alcanza reteniendo los coeficientes de baja frecuencia y eliminando los de alta frecuencia**.

El primer problema que encontramos para pasar una línea al dominio de la frecuencia es que necesitamos conocer los distintos valores de curvatura que va tomando. Pero una **polilínea no tiene curvatura**, ya que está formada por segmentos rectos. Una solución es considerar que la curvatura de un punto es la inversa del radio de la circunferencia que forma junto a los puntos anterior y posterior (Fig. 5)

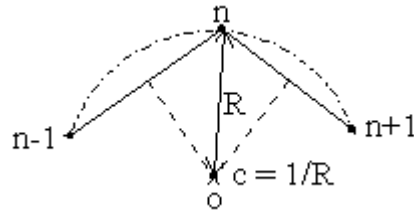


Figura 5. Radio de curvatura de un punto n

Las técnicas espectrales son relativamente recientes, aunque ya han sido varios los autores que han indagado en este tema. Destaca el trabajo de Plazanet (Plazanet et al., 1995), que empleó wavelets para la representación de una línea y su posterior generalización.

Filtrado mediante coeficientes wavelet

Las wavelets son una herramienta procedente del campo del tratamiento de señales e imágenes digitales. Su empleo pretende afrontar parte de los problemas que aparecen al utilizar la serie de Fourier. Según Plazanet (1995), la principal ventaja de las primeras frente a la segunda es que retienen la localización de la curva

Podemos considerar que una **línea es una función unidimensional** definida "a trozos", en cada uno de los cuales la curvatura toma un valor constante (Fig. 6), bien porque se considera como una sucesión de segmentos y pequeñas circunferencias como sugiere Plazanet (1995), o, por el método descrito de calcular para cada punto el radio de la circunferencia que forma junto con los puntos anterior y posterior. Así podemos pensar que estamos ante un **vector en un espacio de j dimensiones V^j** , donde 2 es el número de valores de curvatura, condición que obligará a remuestrear los valores de curvatura para que su número sea de la forma 2^n .



Figura 6. Línea definida como una serie de valores constantes de curvatura (c_n)

Una forma de definir una base ortogonal de un espacio vectorial es como el conjunto mínimo de vectores con los que se puede generar cualquier otro vector de dicho espacio mediante combinaciones lineales. Es decir, las componentes de esa base serán linealmente independientes. Lógicamente, cualquier vector definido en el espacio vectorial ortogonal V^j también estará contenido en el espacio V^{j+1} . Esto nos permite definir un nuevo espacio vectorial W^j , **que es el complemento ortogonal de V^j en V^{j+1}** , sabiendo que dos vectores son ortogonales si su producto escalar es nulo.

W^j también tendrá una base vectorial linealmente independiente cuyas componentes serán llamadas **wavelets**. Podemos pensar que las wavelets nos permiten representar aquellas partes de una función en V^{j+1} que no pueden hacerlo en V^j . Las dos importantes propiedades de las wavelets son:

- Las wavelets de W^j , junto con las componentes de V^j , forman una base en V^{j+1} .
- Cada componente de W^j es ortogonal a cualquier componente de V^j .

Las wavelets utilizadas serán las de **Haar**, que establecen una base muy simple. La base en V^j puede representarse mediante las bases V^{j-1} y W^{j-1} . Éste es precisamente el proceso recursivo en que consiste la descomposición wavelet. La base en V^2 , se puede obtener

mediante la base V^1 y su complemento W^1 . A su vez V^1 se conseguirá mediante V^0 y su complemento W^0 , con lo que V^2 se podrá reemplazar por V^0 , W^0 y W^1 .

Otro requisito que le podemos imponer es que sea normal, es decir, que su módulo valga 1. El módulo será el producto escalar de la base por sí misma y como todas componentes de la base valen 1 ó -1 el módulo siempre será igual al número de componentes de la base, 2.

Hasta ahora no hemos hablado de cómo se puede efectuar la **generalización o compresión con pérdida de información a partir de los coeficientes wavelet**. Este proceso es bastante sencillo. El método reside en ordenar los coeficientes wavelet en valor absoluto y eliminar los más pequeños igualándolos a 0. Al estar normalizada la base, la suma de los cuadrados de los coeficientes eliminados nos proporciona el error total que hemos introducido o la cantidad de información eliminada, por lo que habrá que establecer un umbral de corte. El siguiente paso es reconstruir los valores de curvatura a partir de los coeficientes wavelet, con lo que tendremos una representación frecuencial simplificada de la línea (Fig. 7).

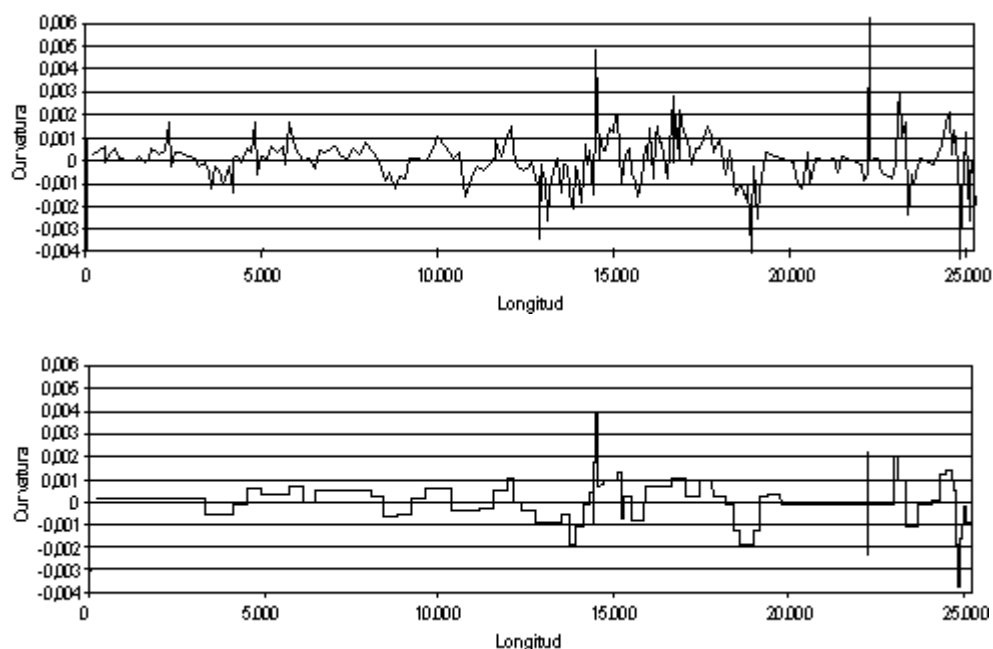


Figura 7. Ejemplo de representación frecuencial de una línea antes y tras la generalización

Cada valor de curvatura puede asociarse a un valor de coordenadas (x,y), con el que podemos establecer distintas operaciones, como calcular la media de las coordenadas de cada grupo de valores de curvatura idénticos consecutivos, ponderarlas o quedarnos con el más cercano a la línea original, por ejemplo. En este trabajo se ha decidido efectuar dos medias aritméticas (en x, y) de cada conjunto de puntos consecutivos con idéntico valor de curvatura.

MEDIDAS EVALUADORAS

Estas medidas constituyen un intento de **evaluar objetivamente** los resultados proporcionados por los algoritmos de generalización, ya que el control visual es insuficiente y subjetivo. Destacan en este sentido los trabajos de **McMaster** (1986) y Jasinski (1990). Para McMaster, las principales medidas a tener en cuenta son:

- Porcentaje de cambio en el número de coordenadas (o nivel de generalización).
- Porcentaje de cambio en la desviación típica del número de coordenadas por unidad de longitud.
- Porcentaje de cambio en la angularidad.
- Vector total de desplazamiento por unidad de longitud.
- Área total de desplazamiento por unidad de longitud.
- Porcentaje de cambio en el número de segmentos curvilíneos.

Sin embargo, hay que enfatizar dos grandes **limitaciones** de estas medidas evaluadoras:

- Están concebidas para algoritmos de simplificación que ofrecen como resultado una polilínea, por lo que en la aproximación matemática con arcos cúbicos se dificulta su aplicación, siendo incluso necesario recurrir a un muestreo, con la consiguiente pérdida de veracidad.
- Sólo sirven para medir el grado de semejanza de la línea generalizada respecto a la original, por lo que únicamente son útiles para aquellos casos en que es un objetivo que ambas sean lo más parecidas posible. Esto es apto para cambios de escala pequeños, pero es totalmente inadecuado para importantes saltos de escala, en los que se busca conservar la tendencia de la línea original más que su forma.

Reinoso (1998) decidió incluir en sus investigaciones tres medidas más a las aconsejadas por McMaster, que darían información acerca de la dispersión de las correspondientes medidas sin signo:

- Porcentaje de cambio en la angularidad con signo.
- Vector total de desplazamiento por unidad de longitud con signo.
- Área total de desplazamiento por unidad de longitud con signo.

Para nuestro trabajo planteamos utilizar las medidas evaluadoras para examinar la fidelidad de la línea filtrada respecto a la original, ya que es lo que se pretende en un pequeño cambio de escala, como lo es desde 1:25000 a 1:50000, además de tratar de emitir un juicio respecto a si el algoritmo ha sido capaz de captar la tendencia de la línea sirviéndonos de la contemplación simultánea de las líneas filtradas y originales. Las medidas elegidas son las utilizadas por Reinoso (1998). Sin embargo, algunas de estas medidas no se adaptan bien para algoritmos de aproximación analítica, como es el caso de los arcos cúbicos ya que, en realidad, fueron concebidas para su utilización con polilíneas.

Así, emplearemos **las ocho medidas** para los algoritmos de **Douglas-Peucker y Visvalingam**, utilizando además el porcentaje de cambio en el número de coordenadas, como variable independiente de normalización de los resultados, esto es, el nivel de generalización deseado, que quedará definido como el tanto por ciento de puntos que permanecen tras la generalización, con valores del **90%, 70%, 50%, 30% y 10%**.

Para el filtrado frecuencial mediante **wavelets** excluirémos las dos medidas de vector total de desplazamiento por unidad de longitud, ya que su cálculo se vuelve complejo y la información que aportan suele estar correlada con las medidas de área total de desplazamiento, con lo que el número de medidas se reduce a seis.

Para evaluar los resultados de la aproximación mediante **arcos cúbicos**, las medidas de porcentaje de cambio en el número de coordenadas y desviación típica en el número de coordenadas no son aplicables, ya que los datos que se almacenan no son pares de coordenadas sino una serie de parámetros que definen cada curva cúbica. No obstante evaluaremos el porcentaje de datos que vamos a almacenar respecto a los de la línea original. Hay que hacer notar que esta variable no puede ser controlada a nuestro antojo para establecer el nivel de generalización, ya que el número de arcos viene determinado indirectamente por el valor de la variable de entrada al filtro gaussiano. Esto puede dificultar el análisis comparativo de los resultados junto con el resto de algoritmos. Asimismo eliminaremos el cálculo del vector de desplazamiento por las mismas razones expuestas para el caso del filtrado mediante wavelets y sustituiremos la suma de los ángulos en las líneas generalizadas por la suma de los ángulos entre las tangentes de los arcos en los puntos de inflexión para el cómputo de las medidas de angularidad. Por tanto, para este algoritmo tendremos cinco medidas.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Analizando los resultados de las **medidas evaluadoras** hemos hallado que:

- **Douglas-Peucker y Visvalingam ofrecen resultados muy similares**, haciendo difícil afirmar cuál se comporta mejor.
- El filtrado wavelet presenta valores mucho mayores respecto al resto de algoritmos en la desviación típica del número de coordenadas, superiores al 100% en las líneas más sinuosas, debido a la contundente eliminación de coordenadas en zonas suaves. Precisamente el valor de la **desviación típica** en la generalización frecuencial mediante **wavelets** se ha mostrado como una **medida sensible a la sinuosidad de una línea**, ya que la dispersión es mayor en las sinuosas y menor en las suaves.
- En el mantenimiento de los puntos de inflexión, Douglas-Peucker y Visvalingam son los más próximos al 100%, indicando un buen mantenimiento de la tendencia direccional. El filtrado wavelet toma valores similares aunque algo menores. Son los arcos cúbicos los que reducen en mayor medida el número de puntos de inflexión, debido lógicamente al suavizado gaussiano previo que elimina las microinflexiones. Esta es una característica favorable para extraer la tendencia de una línea.
- La angularidad con signo muestra gráficas iguales para Douglas-Peucker, Visvalingam y el filtrado wavelet. Sólo se muestra superior éste último para las líneas sinuosas, evidenciando una mayor conservación del signo de las curvas.
- De la observación de la medida de angularidad en valor absoluto se desprende que es la aproximación mediante arcos cúbicos la que muestra los mejores resultados para mantener la tendencia direccional, fundamentalmente en las líneas más suaves, aunque hay que tener en cuenta que los niveles de generalización no descienden hasta el 30% en algunos casos y nunca hasta el 10%. El resto de algoritmos mantienen mejor la tendencia direccional de las líneas más sinuosas.
- El **área de desplazamiento**, tanto con signo como en valor absoluto, indica que **Douglas y Visvalingam son los mejores para mantener la localización de una línea**, sólo manifestándose superior el primero en el nivel del 10%. También se concluye que las líneas sinuosas mantienen mejor su localización que las suaves. Los arcos cúbicos ofrecen desplazamientos mucho mayores. Sin embargo es el **filtrado mediante wavelets el que peor mantiene la posición de la línea original**, con unos valores del área exagerados, que junto a los grandes valores de la desviación típica en el número de coordenadas indica una **mayor capacidad para extraer la tendencia de la línea**.
- La información que proporciona el vector de desplazamiento la consideramos innecesaria, ya que es más útil la que proporciona el área de desplazamiento y más fácil de computar. El cómputo de áreas es equivalente al cómputo de vectores tomando intervalos infinitesimales.

De la **observación directa de las líneas generalizadas y originales** podemos indicar qué algoritmos tratan de mantener la semejanza respecto a la línea original y cuáles tratan de extraer la tendencia:

- **Douglas-Peucker y Visvalingam** son los algoritmos que proporcionan **las líneas más parecidas a la original**, con resultados muy buenos para niveles de hasta el 50% en las líneas más sinuosas, incrementándose hasta el 30% en el resto. Ambos ofrecen líneas casi idénticas, aunque se advierte una ligera disposición de Visvalingam a cortar más las curvas que Douglas. También creemos apreciar una mayor tendencia de Visvalingam a extraer la tendencia general de la línea en los niveles más bajos de generalización.

- La aproximación matemática mediante arcos cúbicos se ajusta peor a la línea original, que Douglas y Visvalingam. Además se percibe claramente un peor ajuste a las pistas de montaña, donde la función $y = ax^3$ no se adapta bien (Fig. 8). En cambio, en otros casos, los **arcos cúbicos ofrecen líneas más suaves, reforzando las curvas principales de la original** (Fig. 9).

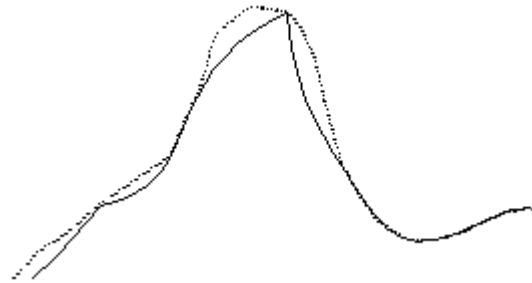


Figura 8. Detalle de generalización con arcos cúbicos con un ajuste inadecuado



Figura 9. Detalle de generalización con arcos cúbicos con un buen ajuste

- El **filtrado wavelet es el que más favorable se ha mostrado a extraer la tendencia de la línea** (Fig. 10), por lo que es **el que peor mantiene la forma de la línea original**, percibiéndose desplazamientos incluso desde los niveles más altos de generalización en algunas líneas y cruces topológicos en los niveles más bajos de las líneas más sinuosas (Fig. 11).

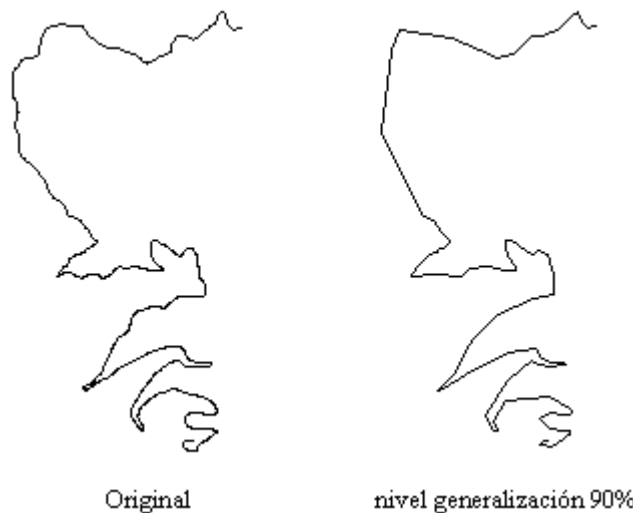


Figura 10. Generalización wavelet de la línea *Almadén*



Figura 11. Generalización wavelet de la línea *Jabalucz*

REFERENCIAS

- **Affholder, J. G. (1993).** Road modelling for generalization. NCGIA Research Initiative 8. Formalizing Cartographic Knowledge. Specialist Meeting Buffalo.
- **Douglas, D. H., y T. K. Peucker (1973).** Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its character. *The American Cartographer*, 10(2): 112-123.
- **Feito Higuera, F., F. de A. Conde Rodríguez y R. J. Segura Sánchez (1995).** *Informática Gráfica Teoría y Práctica*. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico. Universidad de Jaén.
- **García Balboa, José Luis (1998).** Generalización de Elementos Lineales Mediante Algoritmos en el Dominio Espacial y de la Frecuencia. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Jaén.
- **Jasinski, M. J. (1990).** The comparison of complexity measures for cartographic lines. NCGIA.
- **McMaster, R. B. (1986).** A statistical analysis of mathematical measures for linear simplification. *The American Cartographer*, 13(2): 103-116.
- **Plazanet, C., J. G. Affholder, y E. Fritsch (1995).** The importance of geometric modeling in linear feature generalization. *Cartography and Geographic Information Systems*, 22(4): 291-305.
- **Reinoso Gordo, J. F. (1998).** Proceso de Generalización de las Vías de Comunicación de la BCN25 para la Derivación Automatizada de la BCN50. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Jaén.
- **Visvalingam, M., y J. D. Whyatt (1990).** The Douglas-Peucker algorithm for line simplification: Re-evaluation through visualisation. *Computer Graphics Forum*, 9(3): 213-228.
- **Visvalingam, M., y J. D. Whyatt (1991).** Cartographic algorithms: Problems of implementation and evaluation and the impact of digitising errors. *Computer Graphics Forum*, 10(3): 225-235.
- **Visvalingam, M., y J. D. Whyatt (1993).** Line generalization by repeated elimination of points. *Cartographic Journal*, 30(1): 46-51.

AUTOR

JOSÉ LUIS GARCÍA BALBOA jgbalboa@ujaen.es
Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Universidad de Jaén.
Ingeniero Técnico en Topografía. Universidad de Jaén.

Este proyecto se encuentra en la biblioteca de la universidad de Jaén.