



INGEGRAF



XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA

CUBICACIÓN DE TIERRAS MEDIANTE PERFILES. INFLUENCIA DE ALGUNOS FACTORES COMO LA MORFOLOGÍA DEL TERRENO Y LA DISTANCIA ENTRE PERFILES

AGUILAR TORRES, Manuel Ángel; SÁNCHEZ LÓPEZ, Jaime Antonio; AGÜERA VEGA,
Francisco; AGUILAR TORRES, Fernando José; CARVAJAL RAMÍREZ, Fernando

Universidad de Almería, España
Departamento de Ingeniería Rural
Correo electrónico: maguilar@ual.es

RESUMEN

Con este trabajo se pretende determinar cómo influyen en la exactitud de la cubicación de tierras por el método de los perfiles diversos factores entre los que podemos destacar:

- Método empleado para la cubicación de tierras (área media y el método del prismoide).
- La distancia de separación entre perfiles (1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 m).
- Morfología del terreno original (llano uniforme, ondulado, llano rugoso, ladera suave, rambla, montañoso, barranco).

Los puntos muestrales fueron obtenidos mediante fotogrametría digital aérea en superficies de 198x198 m, correspondiendo a superficies topográficas con morfología diferenciada y mallas muestrales regulares de 2x2 m. El análisis de la varianza de los factores estudiados, empleando como variable observada una estimación del error cometido en la cubicación de tierras empleando el método de los perfiles, nos permitió llegar a conclusiones aplicables a casos reales. El trabajo concluye con la obtención de un modelo en el que se relacionan la morfología del terreno y la distancia elegida entre perfiles, con el error cometido en la cubicación de tierras.

Palabras clave: movimientos de tierras, método de los perfiles, modelos digitales de elevaciones, desmonte y terraplén.

ABSTRACT

This work tries to explain the weights of several variables on the accuracy measurement of volumes of lands using the profile method. Among these factors we can stand out:

- Method used for the measurement of volumes of lands (areas average and prismoide).

- Sampling interval between cross-section (1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 m).
- Morphology of the original area (flat, rolling, flat-rough, smooth hillside, dryravine, gorge, mountainous).

The sampled points were collected using digital photogrammetric method in surfaces of 198x198 m, corresponding to topographic surfaces with differentiated morphology and regular meshes of 2x2 m. The analysis of the variance of the studied factors, using as observed variable an estimation of the errors obtained on the measurement of volumes of lands using the method of the profiles, allowed us to come to conclusions applicable to practical cases. The work concludes with the obtaining of a model in whom they relate the morphology of the area and the distance chosen between profiles, with the errors estimated on the measurement of earthwork.

Key words: earthwork, cross-section method, digital elevations models (DEM), cut and fill.

1. Introducción

En una gran cantidad de obras de infraestructura rural es necesario una previa modificación del terreno original, normalmente una explanación horizontal. Este sería el paso previo para la construcción de una nave, un invernadero o una plantación abancalada. En muchas de estas obras el coste de esta modificación del terreno original, que se traduce en movimientos de tierras por exceso (desmonte) o por defecto (terraplén), supone un tanto por ciento elevado de coste total del proyecto.

La cubicación de tierras en proyectos en los que se requiere un acondicionamiento previo del terreno (explanaciones, caminos, balsas...) se ha efectuado tradicionalmente utilizando alguna de las variantes del método de los perfiles transversales (Escario y Escario, 1960; Zurita y col., 1990) en el que los perfiles se realizan a unas distancias que suelen variar entre 15 y 30 m (Aguilar y col., 1999; British Columbia, 2002). Actualmente, con la proliferación de los modelos digitales de elevaciones (MDE), el cálculo de volúmenes de tierras se puede realizar por comparación del MDE del terreno original con el MDE del terreno modificado (Aguilar y col., 2000; Kerle, 2002).

Los objetivos de este trabajo son dos. Por un lado, comprobar la influencia que, para el cálculo de volúmenes de tierras por el método tradicional de los perfiles generados en la realización de explanaciones de plano horizontal, tienen aspectos como la morfología del terreno, la elección de la distancia entre perfiles, situación del plano de la explanación (explanaciones en desmonte, en terraplén y explanaciones a media ladera) y el método de cubicación elegido (área media o método del prismoide). En segundo lugar se pretende elaborar un modelo empírico que relacione los factores que más afectan al error en la cubicación de tierras por el método de los perfiles.

2. Metodología

2.1. Fuentes de variación estudiadas

Para alcanzar los objetivos marcados en este trabajo se estableció un diseño experimental de tipo factorial donde se analizaron como fuentes de variación la morfología del terreno, la distancia entre perfiles, cota de la explanación y el método de cálculo (área media o prismatoides), siendo la variable observada, el error cometido en la cubicación de tierras mediante el método de los perfiles. A continuación describiremos con más detalle cada una de las fuentes de variación enumeradas.

2.1.1. Morfología

Para el desarrollo de este trabajo seleccionamos 7 superficies topográficas de 198x198 m., cada una con unas características morfológicas diferenciadas, desde una rambla típica del Sudeste español a una ladera suave de pendiente uniforme. El modelo digital de elevaciones (MDE) de cada superficie topográfica fue generado mediante restitución fotogramétrica digital automática y posterior revisión/edición por parte del operador. Para ello se utilizó un vuelo fotogramétrico a escala aproximada 1/5000 realizado con una cámara métrica Zeiss RMK TOP 15. Para la construcción del MDE se empleó el módulo Automatic Terrain Extraction del sistema fotogramétrico digital LH Systems SOCET SET NT v.4.3.1., obteniéndose un MDE final con estructura de malla regular (GRID), espaciamiento de 2x2 m. y cotas ortométricas. En trabajos anteriores realizados por nuestro grupo se detallan algunas características generales de las morfologías elegidas (Aguilar y col., 2003).

Como variable descriptora de la morfología de cada una de las 7 superficies topográficas estudiadas, se eligió la desviación estándar de los vectores unitarios normales a la superficie (DEVUN), que en trabajos anteriores ha demostrado una buena correlación con la rugosidad del terreno (Aguilar y col., 2003). Para la obtención del DEVUN (tabla 1) en cada una de las morfologías se calcularon los vectores unitarios normales a la malla regular 2x2 inicial en cada uno de sus nodos. Posteriormente se calcularon sus componentes principales en las direcciones X, Y, Z, obteniendo finalmente la expresión [1]:

$$DEVUN = \sqrt{\text{var } x + \text{var } y + \text{var } z} \quad [1]$$

Los procedimientos descritos se programaron mediante el módulo Scriptor[®], incluido en SURFER[®] 8.01 (Golden Software, 2002).

Tabla 1: Valores calculados de DEVUN para cada una de las morfologías.

Morfología	DEVUN	Morfología	DEVUN
Llano uniforme	0.034	Ladera suave	0.024
Ondulado	0.090	Barranco	0.285
Llano rugoso	0.039	Rambla	0.295
Montaña	0.310		

2.1.2. Distancia entre perfiles

Para el cálculo del volumen de tierras necesario para la construcción de la explanación por el método de los perfiles es necesaria la representación de un número determinado de perfiles transversales, de forma que el volumen total se corresponde con la suma de los volúmenes parciales entre cada dos de estos perfiles. Se tomaron perfiles de forma que la distancia entre dos consecutivos estuviese entre un total de 11 distancias diferentes (1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 m). En cada explanación cuadrada de 198x198 m., se tomaron dos ejes longitudinales ortogonales que unían los puntos medios de cada lado de la explanación. Apoyándose en estos ejes se dibujaron los perfiles transversales que nos sirvieron para realizar la cubicación de tierras. Se tomaron 3 repeticiones por eje longitudinal y por distancia entre perfiles, obteniéndose un total de 6 repeticiones por cada una de las distancia consideradas (figura 1).

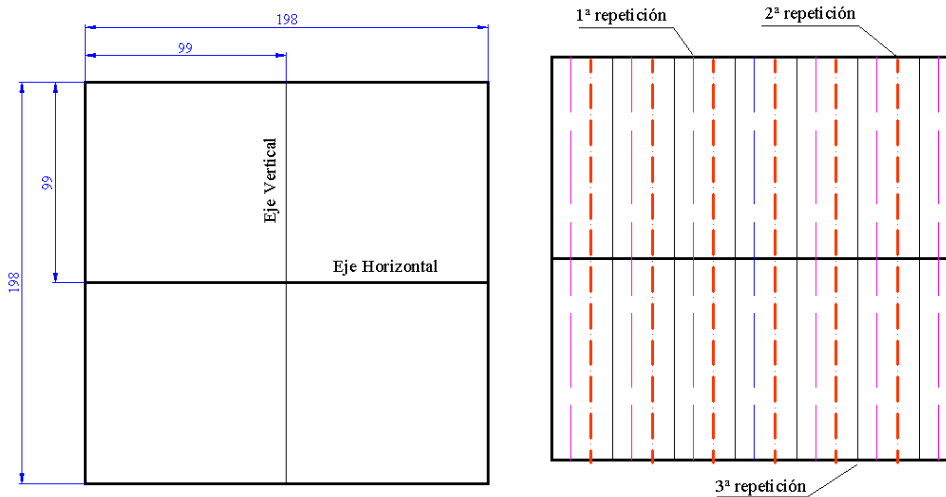


Figura 1: Disposición de los dos ejes en la explanación a la izquierda y toma de tres repeticiones en el eje horizontal para una distancia entre perfiles de 30 m.

2.1.3. Plano de comparación

En cada una de las 7 morfologías estudiadas se realizaron los cálculos de los volúmenes de tierras, en desmonte y terraplén, necesarios para la ejecución de la explanación cuadrada horizontal. Se eligieron 3 cotas diferentes para dicha explanación que en cada morfología coincidían con las cotas mínima, media y máxima de los 10.000 puntos que componían la malla regular del terreno original. Cuando elegimos la cota mínima para las explanaciones obtenemos exclusivamente movimientos de tierras en desmonte, para cota máxima tendremos sólo terraplén y en cota media tendremos tanto desmonte como en terraplén.

2.1.4. Método de cálculo

Para realizar la cubicación de los movimientos de tierras necesarios para la construcción de una explanación horizontal por el método de los perfiles, es necesario

calcular las áreas de desmonte y/o terraplén resultantes de comparar el perfil del terreno original con el perfil final de la explanación horizontal (figura 2).

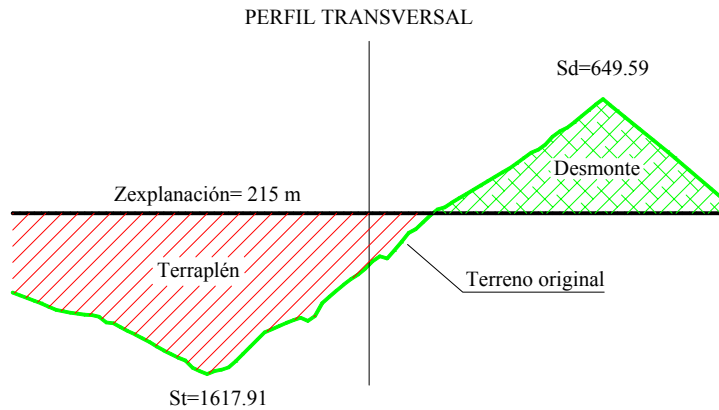


Figura 2: Ejemplo del cálculo de áreas de desmonte y terraplén en un perfil de terreno montañoso con una explanación situada a cota media.

Una vez obtenidas las áreas de desmonte y terraplén de cada uno de los perfiles correspondientes a una repetición, el cálculo del volumen de tierras se realizó utilizando dos métodos diferentes:

a) Método del área media, con el que se determina el volumen entre dos perfiles consecutivos multiplicando la distancia que los separa por la semisuma de la superficie de tierra en desmonte o terraplén obtenidos en esos dos perfiles. Ecuaciones [2] y [3].

$$Vd = \left(\frac{Sd_1 + Sd_2}{2} \right) * d \quad [2] \quad Vt = \left(\frac{St_1 + St_2}{2} \right) * d \quad [3]$$

donde Vd=volumen de desmonte; Vt=volumen de terraplén; Sd₁ y Sd₂=superficies de desmonte en los perfiles 1 y 2; St₁ y St₂=superficies de terraplén entre los perfiles 1 y 2; d=distancia entre perfiles.

b) Método del prismaoide, que considera el volumen entre perfiles como el de un prismaoide. En este caso se determinará su volumen utilizando la superficie de la sección media y de las extremas de cada tres perfiles transversales. De esta forma el cálculo del volumen de tierras entre el perfil 1 y el 3 respondería a la expresión [4], mientras que el desarrollo de n perfiles se calcularía mediante la ecuación [5], siendo d, la distancia entre perfiles y S_i, la superficie en el perfil i.

$$V = \frac{2 * d}{6} (S_3 + S_1 + 4S_2) \quad [4] \quad V = \frac{2 * d}{6} (4S_{pares} + S_n + S_1 + 2S_{impares}) \quad [5]$$

Para realizar los cálculos de volúmenes de tierras por perfiles, tanto por el método del área media, como por prismatoides se utilizó el programa MDT v 3.5 (Navarrete, 2002).

2.2. Obtención de la variable dependiente

La variable observada y dependiente de las fuentes de variación descritas anteriormente fue el error cometido en la cubicación de tierras, expresado en m^3 por m^2 de explanación, mediante el método de los perfiles. Para la obtención de este error debíamos comparar el volumen obtenido en la cubicación de tierras por el método tradicional de los perfiles con el volumen movido realmente. Como estimación del volumen real se realizó el cálculo de volúmenes de tierras por diferencia de la malla regular del terreno original con el plano horizontal de la explanación. Debido a la alta densidad de la malla y a la elevada precisión en la obtención de los 10.000 puntos que la forman, el volumen así calculado constituye una buena aproximación al volumen real.

Para el cálculo de la aproximación del volumen real se utilizó SURFER[®] 8.01 (Golden Software, 2002), que emplea la regla trapezoidal, la de Simpson y la 3/8 de Simpson para la cubicación de los movimientos de tierras. Las diferencias entre estos tres métodos son prácticamente nulas cuando empleamos la totalidad de los puntos

2.3. Análisis estadístico

En el estudio estadístico de los datos obtenidos en el diseño factorial empleado en este trabajo, se empleó el análisis general de la varianza, utilizando el test de rango múltiple de Duncan para la separación de medias. En la separación de medias, datos seguidos de letras diferentes en columnas indican diferencias significativas al nivel de confianza del 95%. Con las 7 morfologías, 11 distancias entre perfiles, 3 cotas de explanación, 2 métodos de cálculo y 6 repeticiones, se generaron un total de 3696 datos de errores de cubicación de tierras mediante el método de los perfiles.

2.4. Modelización de los resultados

Se intentará obtener un modelo matemático que intente explicar el error en la cubicación de tierras, expresado en m^3 de tierras a mover por m^2 de explanación, mediante la introducción de aquellas variables estudiadas en este trabajo que resulten más determinantes. Para la obtención de este modelo se ha realizado un regresión no lineal.

3. Resultados y discusión

En la tabla 2 se presentan los resultados del análisis de la varianza de los factores evaluados, expresándose la variable observada como m^3 de tierras a mover por m^2 de explanación. Podemos comprobar cómo la distancia entre perfiles tomada para la cubicación de tierras es el factor que más influye en los errores cometidos. La

morfología es el segundo parámetro en cuanto al grado de influencia, siendo el tercero el método de cálculo. La elección de la cota de la explanación es la fuente de variación estudiada que menor repercusión tiene sobre el error cometido, aunque se sitúa en un nivel de significación ligeramente inferior al 5%.

Tabla 2: Influencia de las distintas fuentes de variación estudiadas sobre el error cometido en la cubicación de tierras expresado en m^3 por m^2 . (g.l; grados de libertad, s. c.; suma de cuadrados, F; estadístico F).

Fuentes de variación	g. l.	s. c.	F	Probabilidad
(1) distancia perfiles	10	2.564	117.67	$p < 0.01$
(2) morfología	6	1.141	87.28	$p < 0.01$
(3) método cálculo	1	0.038	17.56	$p < 0.01$
(4) Cota explanación	2	0.013	3.10	$p = 0.045$
residuos	3695	8.01		

En la tabla 3 se puede observar la separación de medias ($p < 0.05$) de las variables que menor influencia tienen en el error cometido en la cubicación de tierras. En cuanto al método de cálculo, podemos ver como el método del área media es más exacto que el de prismatoides, cuando se trabaja con el mismo número de perfiles, alcanzándose diferencias significativas ($p < 0.05$). Escario y Escario (1960) dan mayor fiabilidad a los prismatoides, ya que consideran al método de las áreas una simplificación del mismo, cuando las generatrices del prismaoide son paralelas al plano director. Esto implica que estaríamos utilizando tres perfiles en los prismatoides frente a sólo dos en el área media, para estimar el mismo volumen. En lo sucesivo se prescindirá de los datos generados por el método del prismaoide.

Tabla 3: Influencia de las variables método de cálculo y cota de la explanación sobre el error cometido en la cubicación de tierras expresado en m^3 por m^2 . Separación de medias a un nivel de significación del 5%.

Método cálculo	Medias (m^3/m^2)	Cota explanación	Medias (m^3/m^2)
Área media	0.0202 a	Mínima (desmonte)	0.0227 ab
Prismatoides	0.0267 b	Media (media ladera)	0.02155 a
		Máxima (terraplén)	0.02621 b

En lo que a la elección de la cota de la explanación se refiere, podemos ver (tabla 3) que el error cometido en la explanación a cota máxima (terraplén) supera a los otros dos casos. Teniendo en cuenta que lo más habitual será trabajar con explanaciones a media ladera para intentar compensar los volúmenes de tierras en desmonte y terraplén, solamente analizaremos los datos obtenidos en explanaciones a cota media.

En la figura 3 se representa el error en la cubicación de tierras expresado en m^3 por m^2 de explanación frente a la distancia entre perfiles para cada morfología en el caso de explanaciones a media ladera. Las curvas ajustadas al conjunto de datos de cada morfología son potenciales presentando un alto coeficiente de regresión

($0.99 > r^2 > 0.95$). Parece apreciarse una relación directa entre la irregularidad de la morfología del terreno y los errores presentados en la cubicación de tierras.

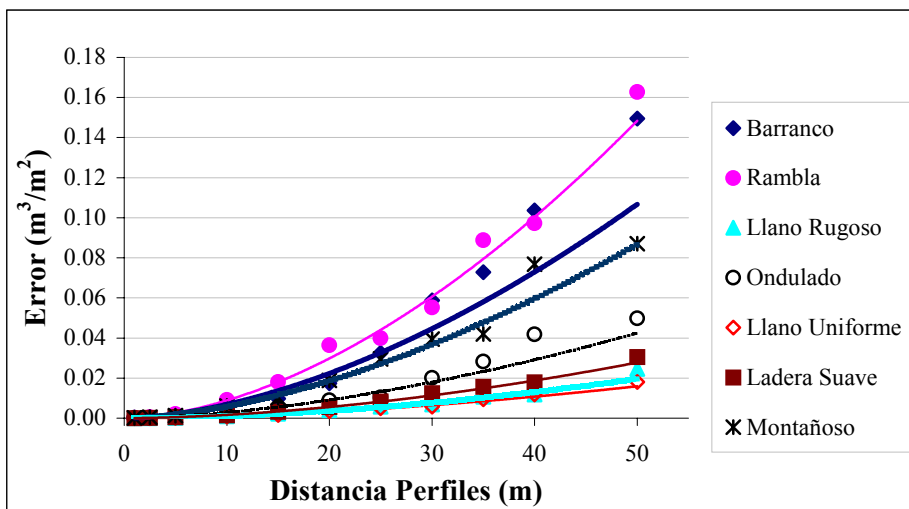


Figura 3: Variación del error en la cubicación de tierras por m² de explanación a media ladera respecto a la distancia entre perfiles para cada morfología..

Tras este análisis de resultados abordamos el segundo de los objetivos de este trabajo, que será la obtención de un modelo que relacione las fuentes de variación más importantes, distancia entre perfiles (dist) y la morfología del terreno expresada mediante la variación de las componentes de los vectores unitarios perpendiculares a la superficie (DEVUN), con el error en la cubicación de tierras expresado en m³ de tierras a mover por m² de explanación. Se ha utilizado el modelo teórico que se expone en la expresión [6]:

$$Error = (a * dist^b) * (c * DEVUN^d) \quad [6]$$

Con él se pretende dar una respuesta práctica a algunas cuestiones que se podría plantear el técnico que se enfrenta a la construcción de una explanación de plano horizontal: ¿qué distancia entre perfiles transversales debería tomar en una explanación realizada sobre un terreno con una determinada morfología (DEVUN), para cometer un error en la cubicación de tierras por el método del área media expresado en m³ por m² de explanación, inferior al requerido?.

Tabla 4: Coeficientes obtenidos en el ajuste del modelo por regresión no lineal y coeficientes de regresión obtenidos para explanaciones a media ladera.

Modelo experimental [6]	a	b	c	d	r ²
Media ladera	0.0014	1.8933	0.1425	0.7563	0.914

Para dar respuesta a esta cuestión se ha generado un modelo para explanaciones a media ladera, basado en datos experimentales que responden a la ecuación [6]. Los

coeficientes de ajuste y el coeficiente de regresión aparecen en la tabla 4. En la figura 4 se presenta el modelo obtenido para explanaciones a media ladera en forma de ábaco, permitiendo realizar la toma de decisiones de forma gráfica .

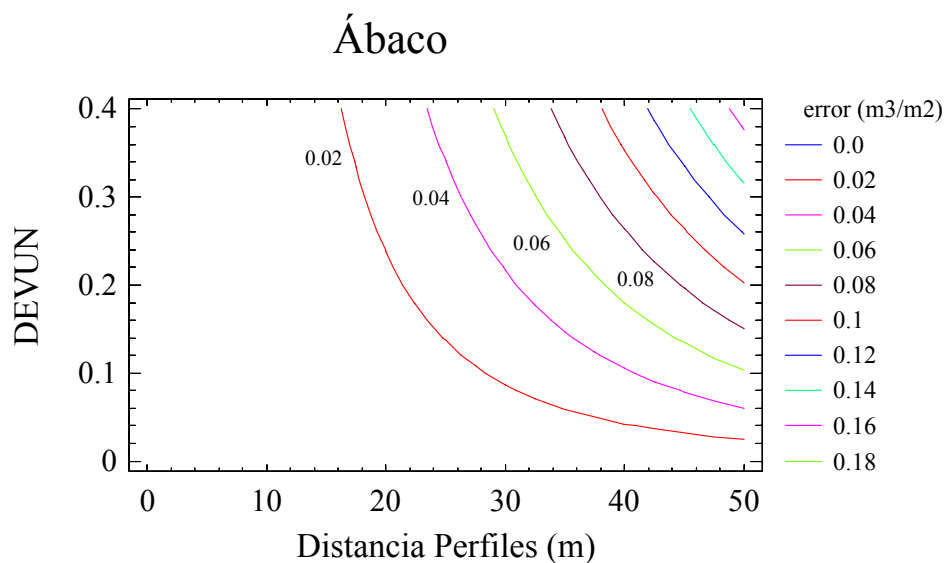


Figura 4: Modelo que relaciona la morfología (DEVUN) y la distancia entre perfiles con el error en la cubicación por m^2 de expansión a media ladera.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo nos permiten extraer las siguientes conclusiones:

- El método del área media ha resultado más exacto que el de los prismatoides, en la cubicación de tierras por perfiles transversales.

- Hay una relación potencial clara entre la distancia entre perfiles y el error cometido en la cubicación de tierras por el método de los perfiles, para cada una de las 7 morfologías empleadas. Por otro lado, la variable morfología también tiene un peso importante en el error cometido en el cálculo de volúmenes. Estos errores aumentan a medida que lo hace la rugosidad del terreno.

- Se puede realizar una modelización del error cometido en la cubicación de tierras por perfiles en función de la morfología del terreno (DEVUN) y la distancia entre perfiles en explanaciones a media ladera. La representación en forma de ábaco de éste modelo nos puede ayudar a la hora de decidir la distancia entre perfiles transversales en un determinado proyecto de explanación.

Estos primeros resultados, aunque bastante interesantes desde el punto de vista práctico, necesitan de futuros trabajos para su consolidación definitiva. Entre ellos podemos destacar la validación del modelo obtenido, o estudiar otros factores que por simplificar el proceso se han obviado en este primer estudio, como por ejemplo la influencia de la consideración de taludes o la adaptación a obras lineales (caminos).

Referencias

Aguilar, M.A., Carvajal, F., De Haro, J.M., Aguilar, F.J., Agüera, F., Gálvez, M.J., *Modelo tridimensional del terreno. Aplicación al control de volúmenes de tierras realizados en las obras de restauración medioambiental de una zona minera.* Mapping, nº 66, pp. 12-18, 2000.

Aguilar F.J., Agüera F., Carvajal F., *Fundamentos para el diseño gráfico de maquinaria e industrias agrarias.*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería, 1999.

Aguilar, F.J., Agüera, F., Aguilar, M.A., Carvajal, F., Sánchez, P.L., *La calidad de los modelos digitales de elevaciones con estructura de matriz regular. Análisis y modelización.* Actas del XV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Nápoles-Salerno, Italia, pp. 188, 2003.

British Columbia Ministry of Forest, *Forest road engineering guidebook 2nd ed.* Forest Practices Code of British Columbia, 2002

Escario, J.L., Escario, V., 1960. Caminos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Cárminos, Canales y Puertos. Madrid.

Golden Software, Inc. *Surfer 8 Users' guide*, Golden Software Inc., Colorado, 2002.

Kerle, N., *Volume estimation of the 1998 flank collapse at casita volcano, Nicaragua: A comparison of photogrammetric and conventional techniques.* Earth Surf. Process. Landforms nº 27, pp. 759-772, 2002.

Navarrete, F., *MDT versión 4. Potencia y facilidad de uso.* Mapping, nº 80, pp. 35-39, 2002.

Zurita, E., Herráez, E., Arias, J.L., *Modelado gráfico del terreno. Explanaciones.* Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola, Lugo, 1990.