

Modelado de calidad para la visualización interactiva de carreteras

Ignacio Pareja, Inmaculada Coma, Salvador Bayarri y Silvia Rueda

Departamento Informática y Electrónica, Instituto de Tráfico y Seguridad Vial.

Universidad de Valencia

Ignacio.Pareja@uv.es

Resumen

En el artículo se presenta un sistema de descripción y modelado de carreteras que sigue la metodología del modelado paramétrico, en la que cada entidad viene definida por varios parámetros variables que describen sus propiedades geométricas (forma, posición), y también las restricciones y las relaciones entre entidades. Se describen estas entidades y la técnica seguida para generar a partir de ellas una estructura jerárquica que permitirá la gestión de niveles de detalle para la optimización del coste. Para conseguir este equilibrio entre número de polígonos y calidad se realiza un muestreo adaptativo de las curvas, alterando la densidad de polígonos en función de la variación del sistema de coordenadas local. Se describirá también la estructura multiresolución adoptada para modelar el terreno circundante a la vía.

Palabras clave: Modelado paramétrico, trazado de carreteras, visualización en tiempo real, simulación visual, multiresolución.

1 Introducción

Una de las aplicaciones de la simulación de conducción con un futuro más prometedor es la evaluación de infraestructuras viarias en un entorno interactivo. Un típico trabajo en esta línea pueden verse en [1]. Esta evaluación puede realizarse sobre trazados ya existentes que se desea diagnosticar, y también sobre proyectos de modificaciones o nuevos trazados cuyas características se quiere estudiar por anticipado. El proceso de evaluación puede ser informal, una exploración realizada por expertos o usuarios basada en un interfaz de vuelo o conducción, o puede requerir el desarrollo de experimentos y toma de datos. En cualquiera de los casos, el modelo visual tiene que aproximarse lo más posible a las especificaciones geométricas reales de un trazado y ofrecer un aspecto realista. Al mismo tiempo, si queremos generar fácilmente este modelo a partir de los datos y planos proporcionados por los ingenieros de carreteras, tenemos que desarrollar algoritmos y herramientas de modelado que nos permitan utilizar directamente especificaciones estandarizadas del trazado en lugar de otras curvas o construcciones propias de los programas de diseño 3D.

La técnica que vamos a utilizar para describir los objetos que componen el trazado de la carretera es bien conocida en CAD/CAM: se trata de seguir la metodología del *modelado paramétrico* [2], en la que cada entidad es definida por varios parámetros variables que describen sus propiedades geométricas (forma, posición). También las restricciones y las relaciones entre entidades estarán descritas en términos paramétricos (por ejemplo, la entidad X está situada sobre las coordenadas relativas x,y en el sistema de referencia local de la entidad Y). A pesar de su aparente simplicidad, la combinación de parámetros, relaciones y restricciones nos permitirá crear modelos de gran complejidad interna. Por ejemplo, como veremos, el comportamiento de la sección transversal a lo largo del eje, que es difícil de describir de una manera simple, puede ser modelado con éxito mediante esta técnica.

Por otra parte, algunos aspectos de la metodología *de modelado basado en rasgos* ('feature-based modeling') también son aplicables a este caso. Aunque el término se suele referir a la extracción de muescas o agujeros en una forma básica, podemos definirlo genéricamente como la asociación de diferentes rasgos geométricos que modifican al objeto y que deben mantenerse, siguiendo ciertas reglas, cuando el objeto sea modificado (reevaluado). En nuestro caso esta asociación consiste en la adición de características situadas en puntos de la vía (*objetos puntuales*) o extendidas a lo largo de ciertos tramos (*objetos de intervalo*).

El resultado de todo el proceso de generación es una estructura jerárquica que permitirá la gestión de niveles de detalle (ver, por ejemplo, [3]) para la optimización del coste. En los niveles más detallados habrá que representar la superficie curvada del trazado con un grado de suavidad aceptable, pero evitando crear un número excesivo de polígonos. Para conseguir este equilibrio se realizará un *muestreo adaptativo* de las curvas en función de la variación del sistema de coordenadas local.

Se describirá también la estructura adoptada para modelar el *terreno circundante* a la vía. En trabajos previos [4] los autores han desarrollado modelos multirresolución del terreno pensados para la visualización de un área amplia, pero en este trabajo se presenta una aproximación diferente, en la que el modelo de terreno, y la estructura de sus niveles de detalle, está pensado para ser visto desde la vía y generado de forma sencilla a partir de mapas.

El software desarrollado consiste en una serie de funciones que generan un fichero para visualización a partir de la descripción paramétrica. Esta descripción puede leerse de un fichero de texto o definirse dentro de una herramienta de modelado 3D. El fichero de visualización puede ser utilizado por librerías estándar en simulación visual para la generación de imágenes en tiempo real.

2 Descripción paramétrica del eje

Los ingenieros de caminos especifican un trazado de carreteras separando la forma de una línea central (eje) de la variación en la sección transversal [5]. A su vez, la forma del eje se define a partir de la *planta* y el *perfil vertical*. Si consideramos el eje z como vertical, y definimos la distancia a origen (*d.o.*) como la longitud recorrida sobre el eje de la carretera en su proyección sobre el plano x,y , la planta consiste en la especificación de x,y en función de la *d.o.* y el perfil vertical es la definición de z en función de la *d.o.* En realidad, la definición de la planta se realiza de forma indirecta, definiendo la variación de la curvatura (el inverso del radio de giro) en función de la *d.o.*, de donde se integran x,y .

La planta se construye como combinación de tres elementos geométricos: segmentos de recta (curvatura = 0), arcos de circunferencia (curvatura constante) y espirales del tipo clotoide (variación lineal de la curvatura) que sirven como transición entre rectas y arcos, o entre arcos de diferente curvatura (ver figura 1). Las clotoides se suelen caracterizar por un parámetro A que indica la magnitud de la variación de la curvatura en función de la longitud. Esta especificación se convierte fácilmente en una descripción paramétrica donde se crea una entidad para cada elemento geométrico, caracterizada por su longitud en *d.o.* y su curvatura (arco) o valor de A (espiral).

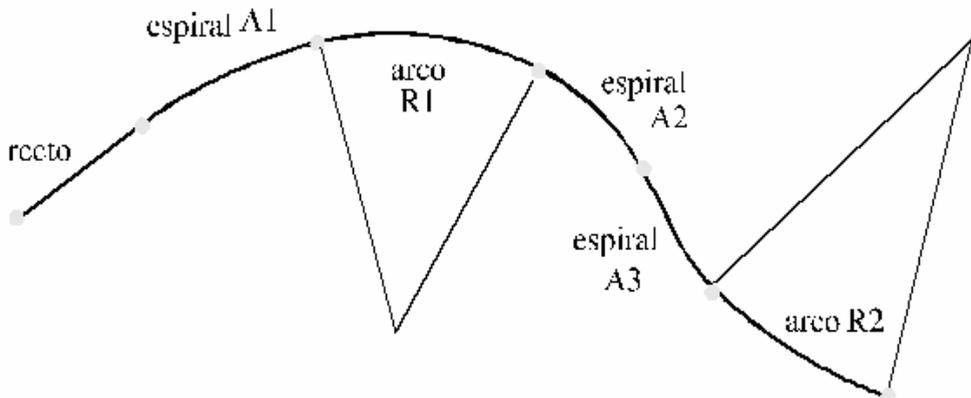


Figura 1: Elementos geométricos utilizados para especificar la planta

Hay que hacer notar que aunque hablamos de descripción paramétrica, con este término nos referimos al método de especificación del modelo. A la hora de evaluarlo debemos tener en cuenta que la espiral no es una curva parametrizable en

función de su longitud, o sea, que para hallar las coordenadas x,y de cada d.o. tenemos que hacer una integración numérica [6]:

$$x = A\sqrt{\pi} \int_0^t \cos(\pi \cdot u^2 / 2) du$$

$$y = A\sqrt{\pi} \int_0^t \sen(\pi \cdot u^2 / 2) du$$

donde $t = \frac{l}{A\sqrt{\pi}}$ y l es la longitud

El perfil vertical se define como una serie de tramos de pendiente constante cuya conexión ('cambio de rasante' o 'acuerdo vertical') resulta suavizada mediante la sustracción o adición a la coordenada vertical de un valor que varía cuadráticamente con la longitud (ver figura 2). Esta descripción puede convertirse en paramétrica creando una entidad de cierta longitud para cada tramo recto y asignando a sus extremos un parámetro que es la longitud del acuerdo vertical, a partir del cual puede calcularse la constante k .

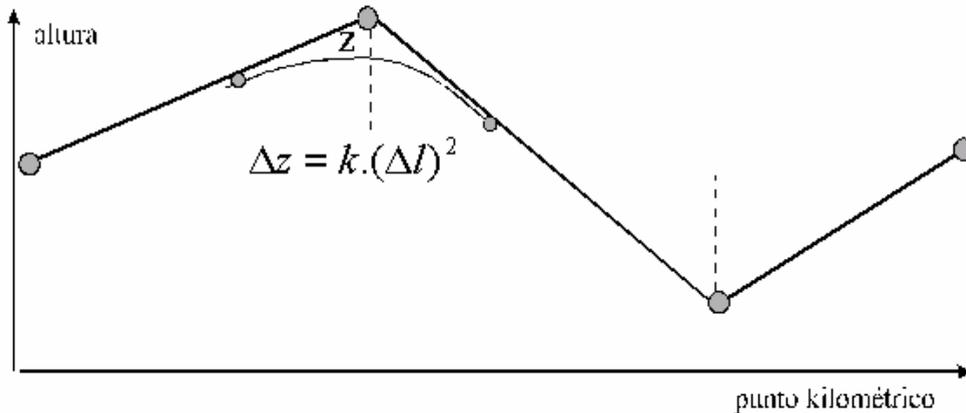


Figura 2: Elementos geométricos utilizados para especificar el perfil vertical

Una tercera secuencia de elementos geométricos que también está asociada al eje es la del peralte, distinta para los lados derecho e izquierdo de la calzada. Un valor positivo implica una elevación respecto al eje. El peralte varía linealmente entre valores del d.o para los que se fija su valor a ambos lados (ver figura 3), y es por tanto muy fácil de parametrizar. Como luego comentaremos, el peralte será evaluado en determinados puntos para ajustar la sección transversal.

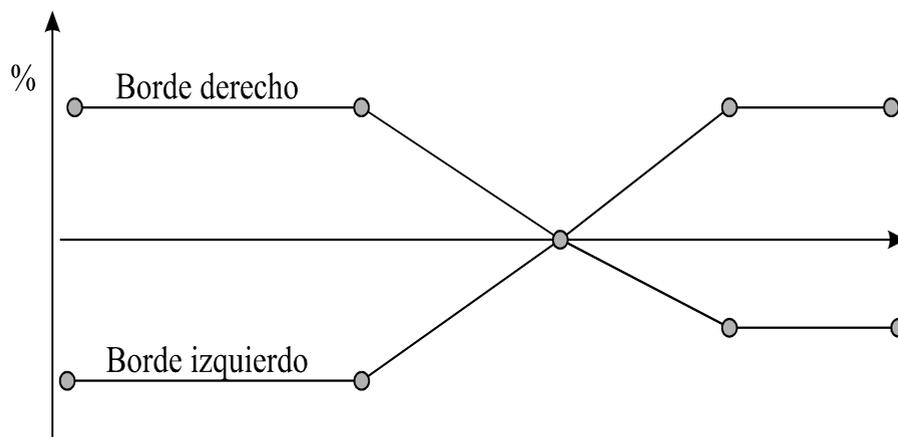


Figura 3: Elementos geométricos utilizados para definir el peralte

3 Edición interactiva del eje

Además de extraer los elementos geométricos y sus parámetros de planos o listados de un trazado real, también es posible crearlos en de una herramienta gráfica interactiva. Para ello se ha implementado un modelo paramétrico de nivel superior en el que la planta viene construida mediante unas entidades denominadas ‘alineaciones’, cuya forma se define por medio de tres puntos de control generales y puntos o parámetros adicionales determinan cómo se descompone en una secuencia de recta, espiral, arco, espiral y recta (ver figura 4). Estas combinaciones son las comúnmente utilizadas en el diseño real de carreteras. El interfaz y las funciones de evaluación y generación de la jerarquía visual se han integrado en una herramienta genérica de modelado 3D [7].

4 Descripción de la sección transversal y objetos asociados

La sección transversal de una carretera tiene un comportamiento geométrico más complejo de lo que pudiera parecer a primera vista. Mientras que las partes correspondientes a la calzada por donde circulan los vehículos deben tener una inclinación dada por el peralte de cada lado, los arcenes tienen siempre inclinación hacia fuera con ciertas restricciones y otros elementos mantienen posiciones relativas o absolutas constantes. El modelo paramétrico con restricciones que se ha desarrollado se basa en descomponer la sección en una serie

de segmentos (ver figura 5) con un atributo que identifica su comportamiento. Al evaluar los segmentos de la sección para unos valores dados de peralte izquierdo y derecho, éstos pueden adoptar posiciones y ángulos absolutos, o bien tomar como referencia para una traslación o giro relativo otros segmentos de la misma sección evaluados anteriormente, por lo cual el orden de evaluación debe controlarse con cuidado. Algunos segmentos, como los arcenes, tienen restricciones adicionales, ya que su inclinación se relaciona con la de otro segmento, pero no puede pasar de ciertos límites (lo que se denomina en la figura ‘giro relativo condicional’).

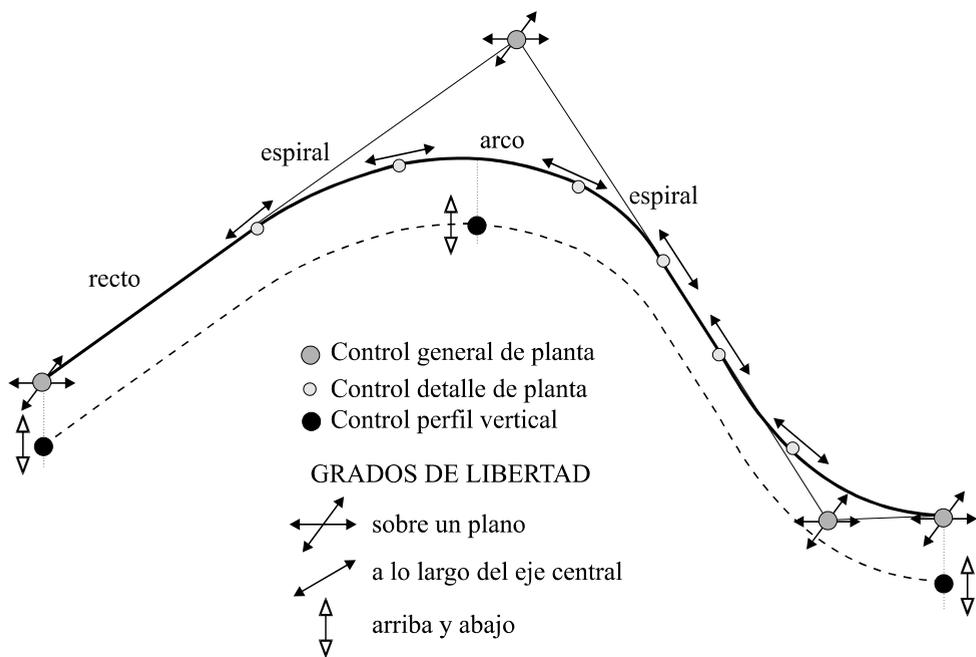


Figura 4: Interfaz basado en puntos de control para la edición interactiva del eje

Antes de evaluar la sección en diferentes puntos del trazado puede modificarse la anchura de los segmentos que la forman, lo que permite variar de forma continua o discontinua propiedades como el número de carriles o el ancho de la mediana (ver figura 6). Asignando un ancho nulo a algunos elementos podemos evitar que estén presentes en el resultado final. Por ejemplo, una misma sección genérica puede utilizarse para entornos urbanos (aparecen entonces las aceras) o interurbanos (aparece una mediana, talud, etc.) y luego eliminarse en cada punto los segmentos que no sean necesarios, sin tener que modificar el proceso de evaluación general.

Existen dos tipos de objetos que están relacionados con la sección transversal. Uno son los objetos puntuales, cuya posición y orientación se calcula con referencia a la posición de uno de los segmentos de la sección. Por ejemplo, para colocar una señal vertical se toma como referencia cierta posición en el segmento llamado ‘berma’ que aparece a continuación del arcén exterior, una vez éste ha sido evaluado. Otro tipo de objetos es el que hemos denominado objetos de intervalo, que se extienden a lo largo de ciertos tramos de la vía. En realidad se modelan como segmentos adicionales de la sección (ver, por ejemplo, el segmento 6 en la figura 5, que podría representar una barrera de protección lateral), a los que hay que añadir información sobre el valor de d.o. donde comienzan y terminan. Algunos casos de objetos modelados mediante este mecanismo son las protecciones laterales (biondas) y la vegetación (setos) de la mediana.

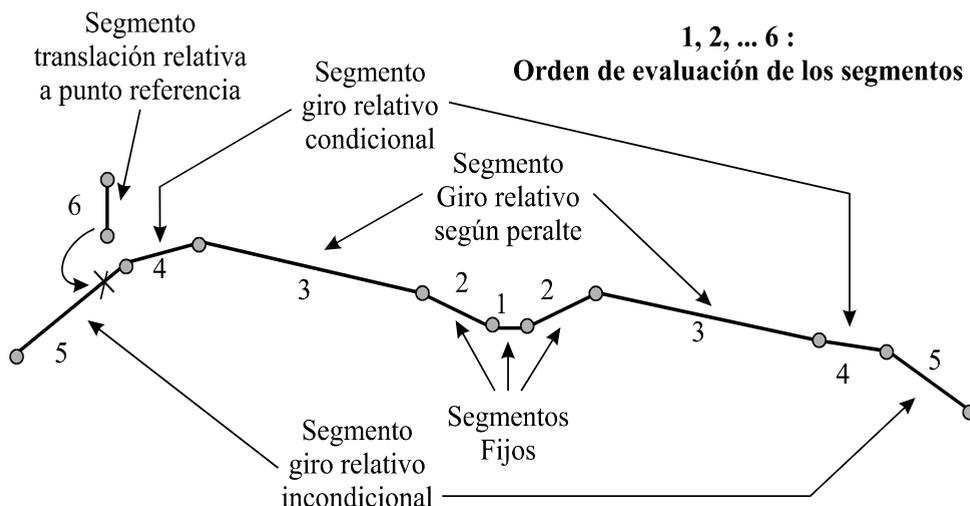


Figura 5: Modelo para el comportamiento de la sección transversal basado en una tipología de segmentos con relaciones y restricciones

Podemos comprender ahora cómo se generan los polígonos que forman el trazado de la carretera. La idea básica consiste en evaluar el eje (hallar las coordenadas x,y,z consultando la planta y el perfil) en ciertos valores de d.o. (puntos de muestra), y evaluar también la sección a partir del valor del peralte en ese punto. Luego se unen todos los segmentos de sección por medio de tiras de cuadriláteros (ver figura 6). Pegando las texturas adecuadas en estas tiras se obtienen resultados muy realistas (ver figura 10).

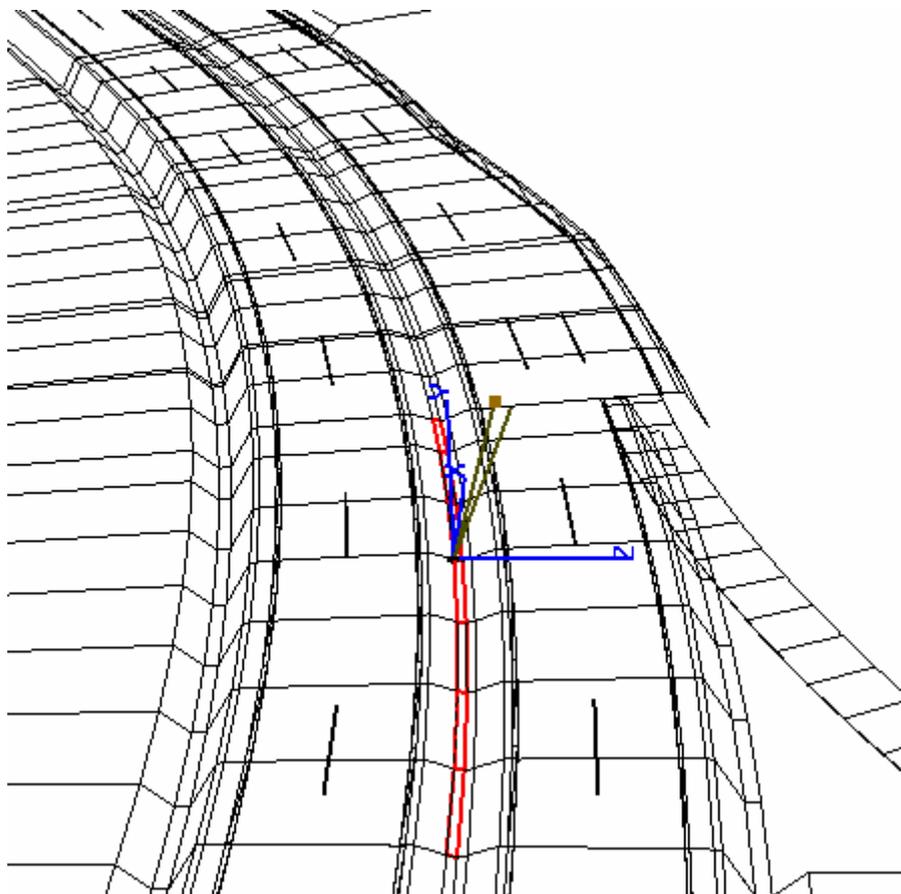


Figura 6: Esqueleto de tiras poligonales generado al muestrear repetidamente la sección transversal a lo largo del eje

5 Muestreo adaptativo

Como se ha comentado, es deseable poder adaptar el número de polígonos del modelo a la variación del trazado, de manera que la calidad visual se mantenga constante. Para hallar los correspondientes puntos de muestra (ver figura 7) se ha utilizado una variante de los métodos numéricos de inclusión [8] para la búsqueda de ceros de una función. En nuestro caso partimos del punto inicial del eje y utilizamos un método numérico para buscar el siguiente valor de d.o. en el que cualquiera de los tres vectores asociados (normal, tangente o lateral) se diferencian

del inicial en un umbral dado¹. Repitiendo este proceso se van hallando los siguientes puntos hasta llegar al final del tramo. El esquema del algoritmo es el siguiente:

```

calcular vectores para d.o. = 0;
repetir
{
  almacenar_pto_muestra( d.o. );
  // buscar el siguiente d.o.
  radio_búsqueda = radio_búsqueda_inicial;
  mientras (radio_búsqueda > tolerancia)
  {
    si el producto escalar con los vectores anteriores es mayor que el
    umbral
      d.o. = d.o. + radio_búsqueda;
    sino
      radio_búsqueda = radio_búsqueda/2;

    si (d.o. > d.o.maximo ) // no superar la longitud maxima
    {
      d.o. = d.o. - radio_búsqueda;
      radio_búsqueda = radio_búsqueda/2;
    }
    calcular vectores para valor actual de d.o.;
  }
}
hasta que (d.o. > d.o.maximo - tolerancia);

```

Además de los puntos de muestra que corresponden a los elementos normales de la sección transversal, tenemos que considerar también los puntos donde comienzan o terminan los objetos de tipo intervalo. Estos puntos se insertarán en el lugar correspondiente de la lista y se evaluará en ellos la sección transversal, creando los correspondientes vértices en las tiras poligonales, de manera que se evite la aparición de discontinuidades entre el objeto intervalo y otros elementos de la sección (ver figura 8).

6 Niveles de detalle y estructura del terreno circundante

Una vez creado el esqueleto poligonal de más alto detalle es fácil generar representaciones menos detalladas de los diferentes tramos sin más que tomar uno de cada n puntos de muestra, donde n varía según la reducción de detalle deseada.

¹ Se pueden utilizar diferentes umbrales para cada vector, de manera que se otorgue diferente importancia a la curvatura en planta, en perfil o en peralte.

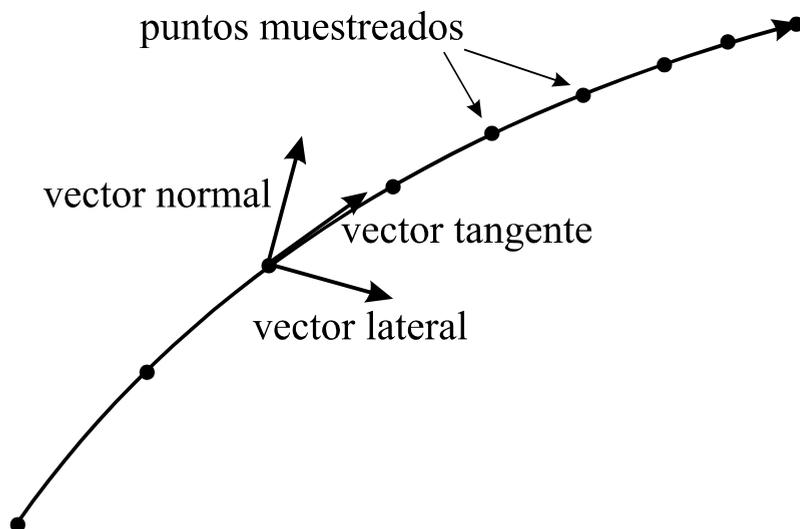


Figura 7: Secuencia de puntos muestreos a lo largo del eje y vectores asociados

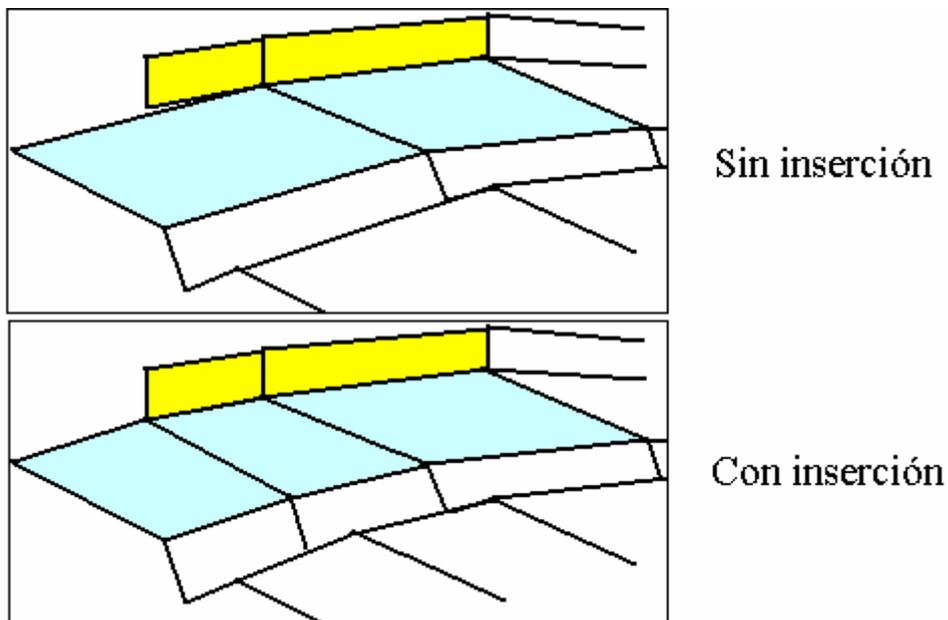


Figura 8: Inserción de puntos de muestra adicionales en el comienzo y final de los objetos intervalo

Un problema más complejo es el tratamiento del terreno. Puesto que éste solamente va a ser visto desde la carretera, se concibe como una extensión de la sección transversal, pero donde la densidad de polígonos debería disminuir con la distancia al eje de la vía. Por otra parte, habría que hacer variar el nivel de detalle global en las diferentes partes del terreno a medida que el observador se moviera por la carretera. Para conseguir simultáneamente estos dos efectos se desarrolló una estructura multirresolución específica, que puede verse en la figura 9 para uno de los lados de la vía.

Cada tramo de carretera tiene asociada una estructura de terreno en forma de ‘cuña’, formada por n bandas, cuya anchura es configurable según las condiciones del entorno. En el nivel más bajo de detalle la cuña comienza por tres triángulos en la banda más alejada y termina junto a la carretera con $2n+1$ triángulos. Cada vez que se pasa a un nivel de detalle superior (ver figura 9 a la derecha), se consideran vértices intermedios en cada banda, multiplicándose por dos el número total de triángulos. En realidad, como se puede ver en la figura 9, al pasar de un nivel de detalle al siguiente se duplica la estructura de la cuña básica. Cada banda se visualiza utilizando tiras de triángulos, lo que permite reducir el número de vértices procesados. La representación de esta estructura multirresolución es relativamente simple, guardándose en un objeto diferente los polígonos de cada uno de los niveles de detalle.

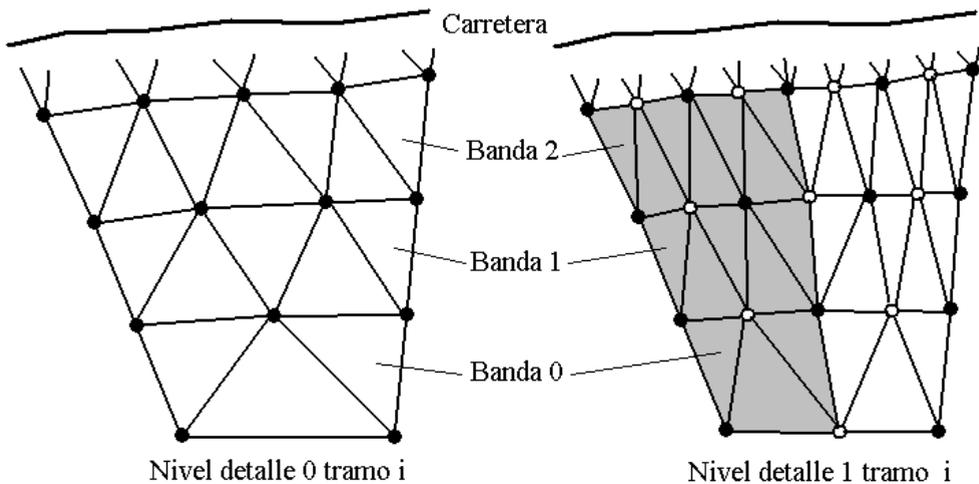


Figura 9: Estructura multirresolución para el terreno circundante a la vía

La estructura de datos de la escena se organiza creando una jerarquía de nodos, utilizadas comúnmente en librerías gráficas como OpenInventor [3], IRIS Performer o en formatos como VRML y OpenFlight. Existen grupos asociados a cada segmento de planta que contienen nodos de selección del nivel de detalle. Estos se conectan a los diferentes objetos poligonales creados por el algoritmo de muestreo. Toda la información se salva en un formato similar a VRML, para el que se han desarrollado cargadores que permiten su posterior visualización utilizando OpenGL o IRIS Performer. La transición entre niveles de detalle se suaviza utilizando la opción de ‘fundido’ (*LOD fading*) de estas librerías.

7 Conclusiones y trabajo futuro

Existen otros sistemas de modelado de carreteras orientados a la simulación en tiempo real. El más conocido son las ‘Road Tools’ integradas en las herramientas Multigen [9]. Este sistema de edición y generación de estructuras de datos fue desarrollado a partir de trabajos realizados en la Universidad de Iowa [10], pero presenta ciertas limitaciones, como el uso de un interfaz que no mantiene automáticamente las restricciones o la definición del perfil vertical mediante un modelo paramétrico que no sigue las especificaciones de ingeniería. Además, en este modelo los puntos que definen el perfil y la planta no son independientes. Todo ello hace que, aún siendo útil para crear escenarios experimentales, sea prácticamente imposible reproducir con él carreteras reales. Limitaciones aún más severas tienen otros sistemas más sencillos, como los presentados en [11, 12].

Los programas utilizados por los ingenieros de caminos para el diseño (ver por ejemplo [13]) proporcionan opciones para definir elementos que no son relevantes para la visualización y, sobre todo, no producen la salida de datos adecuada.

El sistema descrito en este artículo ha probado su aplicabilidad en el diseño de grandes bases de datos para simulación. En el proyecto ALERTA, un contrato con la empresa AUMAR, concesionaria de la autopista A-7, se han modelado cincuenta kilómetros del trazado de esta vía y del terreno circundante para realizar una simulación interactiva incluyendo tráfico (ver figura 10). En este proyecto, además, se ha incluido un mecanismo de paginación, dividiéndose el trazado en tramos de cinco o seis kilómetros que se van cargando dinámicamente en la memoria.



Figura 10: Vista del modelo de la autopista A-7 para el proyecto ALERTA

La gestión del nivel de detalle, realizada por la librería Performer de Silicon Graphics sobre la estructura de datos generada, permite obtener imágenes de gran calidad a 60 fotogramas por segundo en un ordenador SGI Onyx IR2, y de 15 fotogramas por segundo en un ordenador SGI O2.

Como trabajo futuro se plantea la integración de estructuras complejas para las intersecciones y la posibilidad de incluir descripciones e interfaces de alto nivel para éstas (por ejemplo, indicando el número de ramales y el tipo de conexión, y editando la forma general mediante puntos de control).

Referencias

- [1] Hoekstra W. et al. *Visualization of road designs for assesing human factors aspects in a driving simulator*. Proceedings of Driving Simulation Conference '97. 8-9 Septiembre, Paris. De. Teknea. ISBN 2-87717-063-2.
- [2] Shah, J. and M. Mäntylä, *Parametric and Feature Based CAD/CAM*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.

- [3] OpenInventor Architecture Group. *Inventor Mentor: OpenInventor Reference Manual*. Addison Wesley, 1994.
- [4] Bayarri S. et al. *Segmented database and dynamic management algorithms for combined driving simulation*. International Training Equipment Conference ITEC'96. La Haya. Holanda, 1996.
- [5] *INTERFASE: Technical Guide on Road Safety for Interurban Roads*. Federación Europea de Seguridad Vial ERSF, 1996.
- [6] Artz, B. E. *An Analytical Road Segment Terrain Database for Driving Simulation*. Proceedings Driving Simulation Conference 95. 12-13 Septiembre 1995, Paris. Ed. Teknea. ISBN 2-87717-051-9.
- [7] Coma, I. et al. *ARTGRAPH: un entorno integrado de desarrollo y ejecución de aplicaciones 3D tiempo real*. Actas CEIG '98.
- [8] Engeln-Mullges, G. y Uhlig, F. *Numerical algorithms with C*. Springer, 1996.
- [9] Multigen-Paradigm Web Site: www.multigen.com.
- [10] Evans, D. *Ground vehicle database modeling*. Proceedings of Driving Simulation Conference en Real Time Systems '94. 11-14 Enero 1994, Paris.
- [11] Colinot, J.P. y Toumazt J.J. *Evariste: genesis of a road database editor*. Proceedings of Driving Simulation Conference '97. 8-9 Septiembre, Paris. Ed. Teknea. ISBN 2-87717-063-2.
- [12] Moreau, J.M. et al. *Computer-aided design of road networks*. Proceedings of Driving Simulation Conference '97. 8-9 Septiembre, Paris. Ed. Teknea. ISBN 2-87717-063-2.
- [13] MOSS Web Site: www.moss.co.uk.