

# Análisis Multicriterio para la Simplificación de Geometría y Textura de Terrenos

Maria V. Cifuentes<sup>1</sup>, Juan P. D'Amato<sup>2</sup>, Cristian García Bauza<sup>3</sup>,  
Marcelo J. Vénere<sup>2</sup>, Pablo Lotito<sup>2</sup>, Alejandro Clause<sup>2</sup>

PLADEMA-ISISTAN, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires  
Tandil, Buenos Aires 7000, Argentina  
{cifunte,jpdamato,crgarcia,venerem,plotito,clause}@exa.unicen.edu.aren-mail address

## Abstract

This paper propose the visualization of large landscape from the fusion of simplified versions of digital elevation models and satellite photos. Such approximations are extracted from independent hierarchical quadtrees, that organize successive subdivisions of the two-dimensional space imposed by criteria based on local curvature and color standard deviation (at terrain and image, in that order). The approximations are selected by a heuristic based on multicriteria analysis that guarantee the accurate visual quality for the available computational resources. In addition, the paper include an example application on actual large elevation models and satellite photos.

**Keywords:** Polygonal Simplification of Digital Elevation Model, Compression Algorithms, Texture Mapping, Multicriteria Analysis.

## Resumen

Se propone la ágil visualización de grandes escenarios exteriores a partir de la fusión de versiones simplificadas de modelos digitales de elevación y de fotografías aéreas o satelitales de la zona. Tales aproximaciones se extraen de jerarquías quadtrees independientes que organizan sucesivas subdivisiones del espacio bidimensional gobernadas por criterios basados en la curvatura local y en la desviación estándar del color (en terrenos e imágenes respectivamente). Para la selección del par de aproximaciones que componen la representación se propone una heurística basada en el análisis multi-criterio que garantiza la calidad visual adecuada al conjunto de recursos computacionales disponibles. Además, se incluye una aplicación a grandes modelos de elevación e imágenes satelitales reales.

**Palabras claves:** Simplificación de Modelos Digitales de Elevación, Compresión de Imágenes, Análisis Multicriterio, Mapeo de Textura.

## 1 INTRODUCCIÓN

Algunos de los juegos tridimensionales, simuladores para entrenamiento de operarios, etc. de la actualidad se desarrollan sobre grandes escenarios virtuales; muy livianos, lo que los convierte en ideales para el trabajo en Internet. Los escenarios virtuales son archivos mucho más pequeños que

---

<sup>1</sup> CIC Profesional de Apoyo, Comisión Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

<sup>2</sup> CONICET

<sup>3</sup> UNCPBA

un video y crean mayor impacto por la interacción con el usuario. A veces se crean a partir de escenarios reales como en este trabajo donde se propone la ágil visualización de grandes escenarios exteriores componiendo modelos digitales de elevación y fotografías aéreas o satelitales de la zona.

Los Modelos Digitales de Elevación o MDE conforman grandes volúmenes de datos, establecidos a través de una función continua que asigna a cada punto del plano el dato de elevación correspondiente. Constituyen una representación de una determinada porción de la superficie terrestre descrita por una grilla regular geo-referenciada. Las imágenes capturadas desde satélites completan la representación, representando la apariencia de un área definida píxel a píxel en una grilla regular. La densidad de ambas grillas determina la calidad de la representación y es usual encontrar modelos con varios millones de píxeles; en consecuencia, resulta interesante proponer técnicas algorítmicas sencillas, fáciles de implementar que optimicen la visualización de terrenos. Entre las más conocidas en simplificación de MDEs, se destacan la representación por niveles de detalles conformes al punto de vista del observador, la eliminación de regiones del terreno temporariamente invisibles, el empleo de técnicas que efectúan transiciones suaves en la geometría de la malla, etc. [1-5].

En este trabajo se aplica nuestra metodología para la simplificación de modelos topográficos que construye una jerarquía quadtree de la que pueden obtenerse aproximaciones del mismo terreno con resolución variable [6]. Más tarde, esta idea fue redefinida y aplicada a dominios interactivos que demandaban el remallado en tiempo real del MDE [7]. En esa ocasión, se reusa para la compresión de imágenes satelitales por lo que se construye una nueva jerarquía quadtree de la que pueden obtenerse compresiones de la misma imagen con resolución variable. Finalmente, la visualización del terreno surge como la combinación de dos aproximaciones de modelo e imagen, que serán extraídas de las correspondientes jerarquías quadtrees generadas previamente.

Nótese que, la calidad visual de la representación depende de las dos aproximaciones seleccionadas; por ejemplo, si una fotografía muy detallada cubre un modelo de baja resolución, hay disponible mucho detalle para un modelo de superficie demasiado simple comparado con la resolución de la imagen o textura. En el otro extremo, la figura 1 también reproduce una situación con calidad visual inadecuada resultante de la fusión de un modelo de elevación muy detallado con una textura imprecisa.

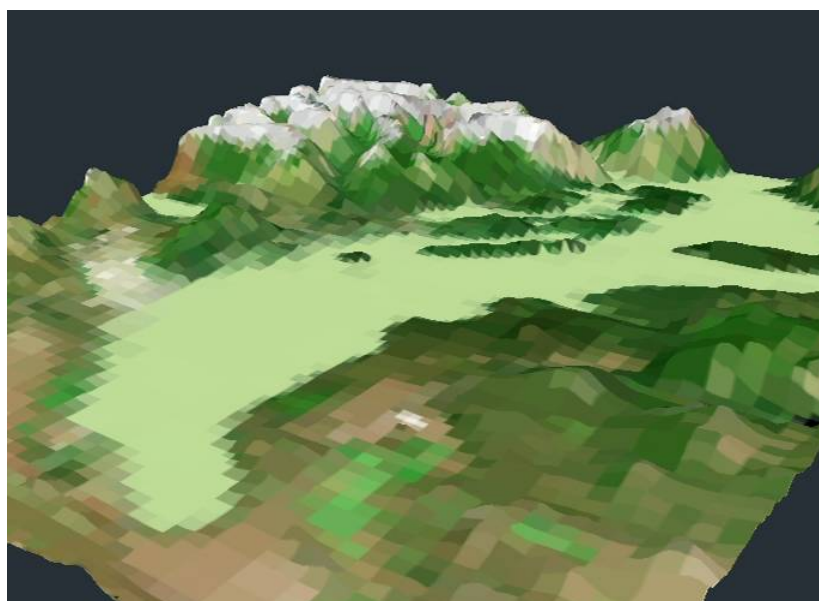


Figura 1- Resolución de textura contraproducente para la visualización de terrenos complejos.

Finalmente, se propone una técnica ágil basada en el análisis multicriterio para seleccionar el mejor par candidato de aproximaciones del modelo y de la imagen. Este problema es aún más relevante cuando los recursos computacionales son críticos y condicionan la visualización del terreno, el espacio de almacenamiento requerido, el ancho de banda solicitado, etc.

En cinco secciones se plantea y propone una alternativa para la representación conjunta de modelos e imágenes satelitales reales. Como se ha mencionado, cuando los recursos computacionales disponibles son críticos es necesario acudir a versiones simplificadas de modo de agilizar la representación visual conjunta. Por tanto, en la sección 2 se describen las metodologías sugeridas para la simplificación de modelos digitales de elevación y la compresión de imágenes digitales y en la sección 3 se sugiere una solución viable para seleccionar ambas aproximaciones basada en el análisis multicriterio. El objeto es conformar una representación cuya distorsión visual sea conveniente. La sección 4 presenta la aplicación de la propuesta, específicamente los resultados de simplificaciones del modelo digital de elevación y de fotografías satelitales de la región correspondiente al lago Nahuel Huapi, Argentina. Finalmente, la sección 5 presenta a las conclusiones y trabajos futuros.

## **2 SIMPLIFICACIÓN DE MDE E IMÁGENES SATELITALES**

En principio se expone brevemente las principales características del algoritmo que reduce la cantidad de polígonos que definen a los modelos topográficos, sin perder calidad en la imagen generada. Decimos que una región adquiere el grado de detalle necesario cuando la información contenida en ella cumple con un dado criterio de tolerancia permitido, situación que se alcanzará después de un proceso continuo de subdivisiones sucesivas. Como indicador de cuales sectores pueden ser simplificados y cuales no, se utiliza la curvatura local de la región que compara la desviación de la geometría intrínseca de la superficie respecto a la geometría del plano. La idea es que una región con alta curvatura cambia abruptamente su pendiente y tiene que ser modelada con más triángulos por unidad de área que una región de baja curvatura que permanece relativamente plana. De esta forma los lugares con baja curvatura pueden ser simplificados sin perder calidad, lo cual en general permite reducir la cantidad de polígonos en un factor diez y este factor es aún mayor si se tolera una cierta pérdida [6].

El método que reduce la complejidad geométrica de superficies extensas transforma el campo de alturas original en un campo cuadrado cuya longitud de lado es potencia de 2 y puede expresarse como  $L/2^k$ , donde  $k$  identifica el nivel de refinamiento y  $L$  el tamaño del dominio [8]. El algoritmo subdivide al nodo raíz en amplitud (breadth first) hasta que se cumpla con el criterio de tolerancia presentado; es decir, subdivide cuando el “acumulado de curvaturas” (o suma de los valores de curvatura local de cada celda de una región del MDE) supera al valor de tolerancia permitido. Finalmente, construye una jerarquía de mallas con complejidades diferentes que representan el mismo terreno organizadas en un quadtree (árbol cuaternario). Cada cuadrado en la jerarquía poseerá un error determinado, que puede ser mayor o igual al error de todos sus descendientes. Los nodos más pequeños se ubican en los niveles más inferiores y con los terminales se construye la malla poligonal de máxima resolución (sin error).

Otro problema es la no conformidad de la malla generada, presencia de huecos en la trama de la malla que son perceptibles en la visualización. Nuestro algoritmo genera un quadtree restringido con el requerimiento que cuadrantes adyacentes -bloques quadtree vecinos localizados con los algoritmos propuestos por Ibaroudene [9] deben diferir a lo sumo en un nivel en la jerarquía quadtree [10]. A partir de este tipo de árbol, generar la triangulación es un proceso mucho más

simple ya que una hoja solo puede encontrarse en una de 16 posibilidades o templates. Es decir, para generar la triangulación basta recorrer los terminales del árbol y dividir las hojas según el template correspondiente. Es interesante observar que la triangulación que se obtiene en esta manera presenta solo cuatro tipos de triángulos de forma diferente, todos ellos de excelente calidad.

La figura 2 muestra aproximaciones de la superficie correspondiente a la cuenca del arroyo Santa Catalina en la ciudad de Azul, provincia de Buenos Aires. Ambas representaciones se extrajeron de la misma jerarquía quadtree con restricciones. La cantidad de polígonos que constituyen a cada una de estas mallas de triángulos se debe a que el usuario tolera un cierto error; en la figura, la malla más densa presenta menos imperfecciones (error) que la menos densa. No obstante, al tratarse de una extensa planicie son necesarios unos pocos polígonos para representarla sin perder la apariencia general del modelo.

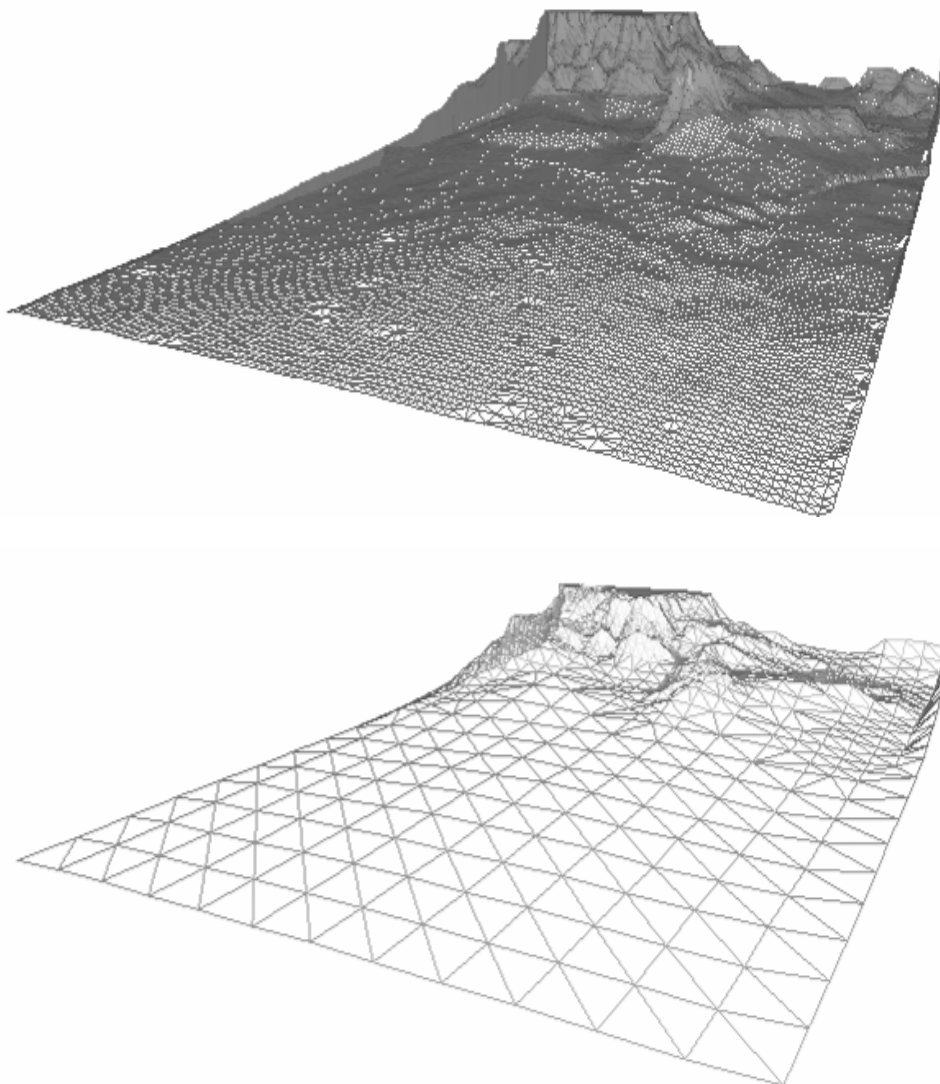


Figura 2- Aproximaciones del MDE de la Cuenca del arroyo Santa Catalina.

En resumen, el algoritmo de simplificación de modelos topográficos construye diversas aproximaciones de un mismo terreno compuesto por  $n$  cotas en  $O(n \log n)$  [6]. Además, su eficiencia también se ha comprobado en sistemas de tiempo real como se propuso el remallado interactivo para la navegación de grandes MDE en [7].

A continuación se aplica la metodología anterior a la compresión de imágenes satelitales, sin perder calidad en la representación. En esta ocasión, el criterio de homogeneidad ofrecido introduce el concepto de desviación estándar del color, calculada separadamente en los tres canales del modelo de color RGB. El proceso de descomposición subdivide a la imagen original en cuatro regiones de igual tamaño hasta que cumplan con el criterio de homogeneidad sugerido: es decir, cuando el acumulado de desviaciones estándar en la región analizada supera un cierto valor tolerado, el proceso dispara una nueva subdivisión. Finalmente, las sucesivas subdivisiones se organizan en una jerarquía quadtree sin restricciones y con los terminales se construye la aproximación o imagen comprimida sin pérdida (tolerancia nula). Además, si se tolera una cierta pérdida es posible extraer versiones más simplificadas de la imagen como lo ejemplifica la figura 3.

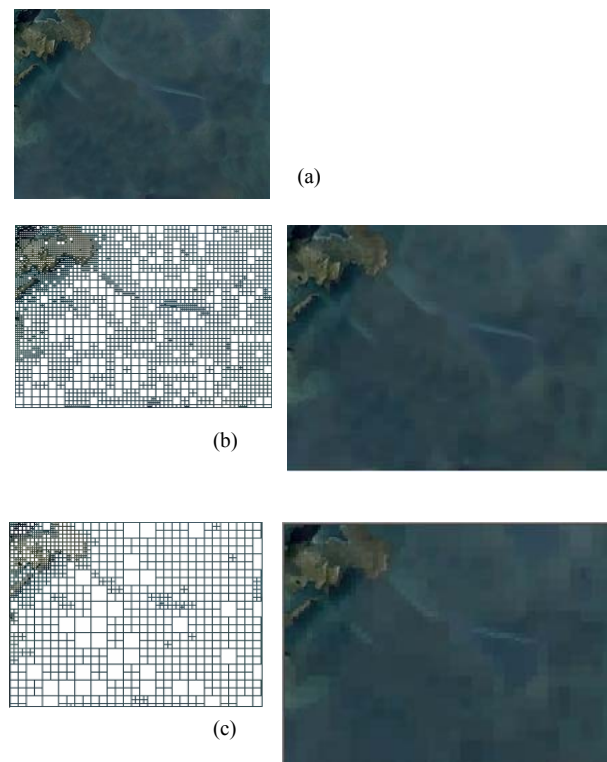


Figura 3- Imagen original (a) y dos versiones comprimidas con el 10% (b) y el 3% (c) del original.

### 3 VISUALIZACIÓN DE TERRENOS TEXTURADOS: EL PROBLEMA DE LA RESOLUCIÓN

La visualización de terrenos reales demanda la representación de grandes MDEs y de fotografías satelitales tomadas en la zona con resolución completa. Básicamente, la idea es componer modelos livianos con las simplificaciones de mallas y texturas construidas de modo tal que su combinación produzca una calidad visual aceptable. El proceso de simplificación presentado construye varias versiones de un mismo MDE. La calidad visual de tales aproximaciones guarda relación directa con la tolerancia permitida: cuanto mayor es la tolerancia, menor es la cantidad de vértices que definen al modelo, deteriorando así la calidad visual y recíprocamente.

Este trabajo propone como indicador de calidad visual el acumulado de las distancias entre componentes  $z$  (altura) de cada centroide de los triángulos de la grilla regular o MDE y su equivalente en la malla aproximada. De esta manera, el indicador de calidad puede estimarse como

$$D(M_i) = \sum_{\forall \hat{a} \in M} (z - z_i)^2 \quad (1)$$

donde  $D(M_i)$  es la calidad visual de la malla de triángulos aproximada  $M_i$ , estimada acumulando las diferencias  $(z - z_i)$  donde  $z$  es la altura del centroide de los triángulos en la grilla regular original y  $z_i$  es la altura del mismo centroide en la aproximación.

Similarmente, y como indicador de la calidad de las imágenes comprimidas que integran la segunda jerarquía se adopta también a la distancia, aunque en esta oportunidad se calcula como el acumulado de las diferencias de color entre la versión original y comprimida de la imagen. Las distancias entre colores se estima calculando las diferencias por cada canal del modelo de color RGB, expresadas como

$$D(T_j) = \sum_{\forall p \in T} (rgb_T - rgb_{T_j})^2 \quad (2)$$

donde  $D(T_j)$  es la calidad visual de la versión comprimida de la imagen o textura  $T_j$ .

Además, cuando ciertos recursos computacionales necesarios son críticos como la cantidad de memoria necesaria para procesamiento o almacenamiento, el ancho de banda, etc. surge la necesidad de seleccionar el mejor candidato malla-textura que disminuya la distorsión en la pantalla sujeto a esta disponibilidad de recursos. En particular, las funciones  $C(M_i)$  y  $C(T_j)$  cuantifican la memoria necesaria para el candidato  $(M_i, T_j)$  formado por la malla de triángulos  $M_i$  y la textura  $T_j$ , extraídas de las respectivas jerarquías quadrees. El par de aproximaciones  $(M_0, T_0)$  no introduce error pero es el más denso de la jerarquía.

Finalmente, la selección del mejor candidato  $(M_i, T_j)$  resulta un problema multicriterio que puede enunciarse como

$$\begin{aligned} D_{\min} &= \min_{i,j} D(M_i, T_j), \\ \text{s.a.} \quad &C(M_i) \leq C(T_j), \\ &C(M_i) + C(T_j) \leq C, \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $i \in \{0, 1, \dots, m\}$  y  $j \in \{0, 1, \dots, t\}$  con  $m$  y  $t$  versiones aproximadas extraíbles de las respectivas jerarquías y  $C$  acotando el almacenamiento destinado al par  $(M_i, T_j)$ . Este problema puede resolverse examinando todas las combinaciones posibles ( $O(n^2)$ ), pero se cuenta con un algoritmo mucho más eficiente ( $O(n)$ ).

Las versiones simplificadas del terreno y las comprimidas de la imagen satelital representan la entrada del algoritmo que selecciona el mejor candidato malla-textura. Es así como, las  $n$  mallas de triángulos y las  $t$  imágenes comprimidas se organizan en conjuntos ordenados decrecientemente de

acuerdo a la cantidad de memoria necesaria para su almacenamiento o manipulación, la solución al problema se resuelve en  $O(n)$  aplicando la técnica algorítmica Greedy como se esquematiza a continuación.

entrada:  $M = \{M_i\}$  con  $i \in \{0, 1, \dots, n\}$  y  $T = \{T_j\}$  con  $j \in \{0, 1, \dots, t\}$

Selección ( $M; T$ )

for (  $i=0$  ;  $(i \leq n)$  ;  $i++$ )

for (  $j=0$  ;  $(j \leq t)$  &  $(C(M_i) \leq C(T_j))$  ;  $j++$ )

if  $(C(M_i) + C(T_j) \leq C)$  devolver  $(M_i, T_j)$  FIN

devolver “no se encontró solución” FIN

Nótese que, la condición para continuar con la búsqueda del par candidato también está restringida. Debido a que generalmente las texturas conservan mayor resolución que los modelos, es conveniente que la cantidad de polígonos del modelo no supere a la cantidad de elementos definidos por la textura. Por otra parte, esta propuesta estima la cantidad de memoria evaluando la totalidad de los elementos de ambas aproximaciones. Surge aquí, una nueva propuesta que separa la distorsión que introduce el modelo de la que introduce la textura. Finalmente, se enuncia la distorsión  $D(M_i, T_j)$  como

$$D(M_i, T_j) = \alpha D(M_i) + \beta D(T_j)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son factores positivos que ponderan la distorsión introducida por cada aproximación, problema ya resuelto por Horbelt en [11] y sobre el que se enfocarán nuestros futuros trabajos.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados aquí presentados surgen de aplicar la metodología propuesta para la reducción de la topografía e imágenes satelitales tomada en la zona del lago Nahuel Huapi (Bariloche, Argentina). En particular, el recurso crítico de interés es la cantidad de memoria necesaria para la representación conjunta de un par de aproximaciones.

El MDE reúne a 369,264 polígonos de los cuales sólo el 85% integran la malla de triángulos más aproximada (sin error), generada siguiendo las descomposiciones sugeridas por el criterio de simplificación basado en la curvatura local. En la figura 4, los gráficos representan al error o distorsión visual y al porcentaje de los triángulos originales que componen cada aproximación del MDE estudiado. Estas mallas de triángulos fueron extraídas desde la jerarquía quadtree restringida cuando se tolera un cierto error y, en particular, la aproximación con distorsión nula se conforma con los nodos terminales de la misma. Nótese que, a medida que aumenta la tolerancia (o threshold) no sólo disminuye la calidad visual (aumenta el error o distorsión) sino también la cantidad de triángulos que componen a la aproximación.

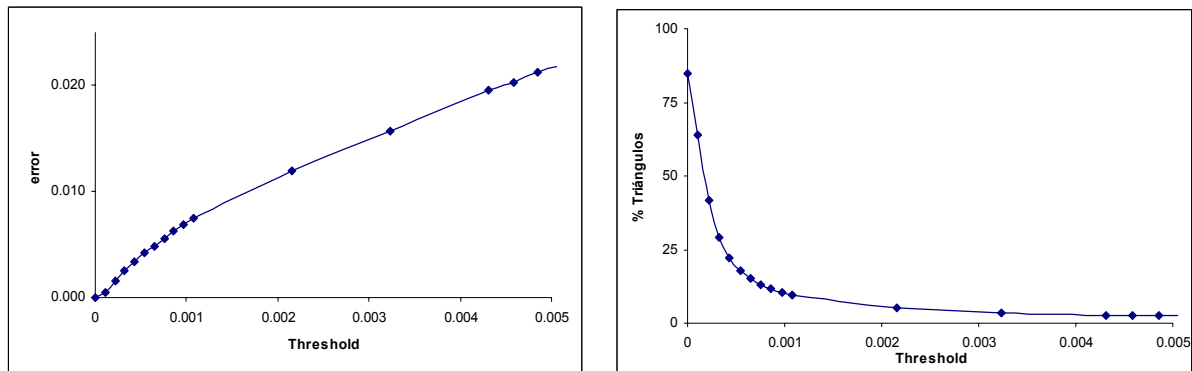


Figura 4- Resultados arrojados por el algoritmo de simplificación asignando distintos valores de umbral (threshold) en el procesamiento del MDE del Lago Nahuel Huapi.

En esta oportunidad, se muestran los resultados de aplicar el proceso de compresión de imágenes propuesto a la foto satelital original que describe con más resolución (945,068 texels o elementos de textura) a la misma porción de superficie que el MDE antes simplificado. Similar al estudio presentado en la figura 4, los gráficos de la figura 5 representan la distorsión visual (error) y el porcentaje de los texels originales que componen cada versión comprimida. También, las versiones aproximadas fueron extraídas de la jerarquía quadtree sin restricciones. Nótese que, con el 83% de los texels es posible reconstruir la imagen original (sin pérdida) y a medida que se incrementa el valor tolerado (threshold) sucede que también baja la calidad y disminuye la cantidad de texels necesarios para la reconstrucción.

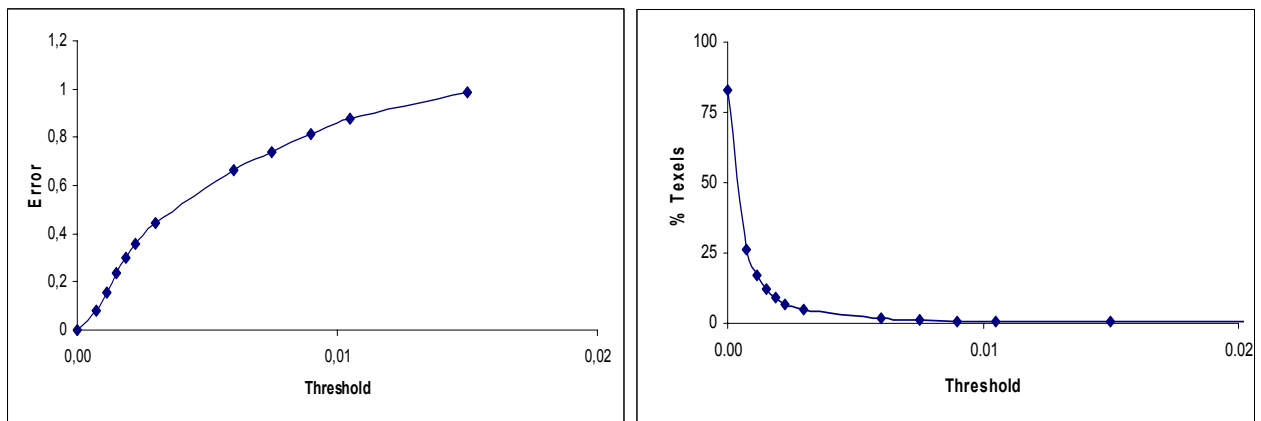


Figura 5 – Compresiones de la imagen Satelital del Lago Nahuel Huapi.

La figura 6 representa la relación entre la calidad visual de los pares aproximados y el consumo de memoria. Cada elemento de la superficie representada es un par  $(M_i, T_j)$ ; en rojo se distingue al par  $(M_0, T_0)$  o aproximación sin pérdida. Además la figura representa a siete curvas de nivel, curvas que agrupan a todos los pares que demandan la misma disponibilidad de memoria. Así que, en un extremo de una curva de nivel los pares tienen textura precisa y mallas simples mientras que en el otro extremo, los pares son modelos complejos y texturas simples. Ambas situaciones no conducen a buenas soluciones, por tanto siempre es necesario optar por los pares ubicados en el medio (línea punteada en rojo).



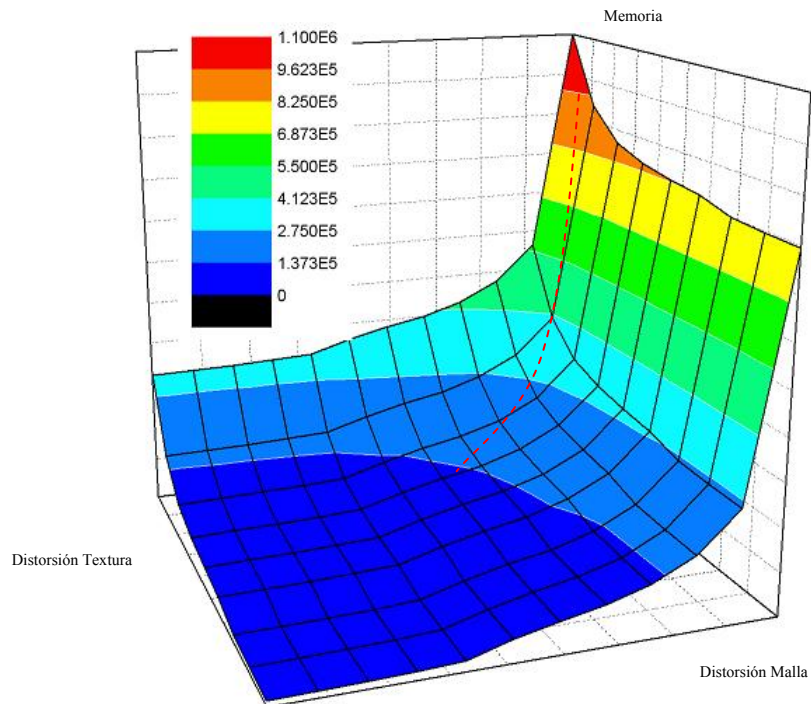


Figura 6 – Consumo de memoria y calidad de las aproximaciones conjuntas (terreno y textura).

Las capturas de la figura 7, que ejemplifican gráficamente la idea de este trabajo, se obtuvieron con el editor gráfico desarrollado en el PLADEMA [12]. En particular, se presentan tres combinaciones conjuntas de aproximaciones de modelo e imagen del lago estudiado:

- la primera reúne a una malla de triángulos con 284,000 polígonos cubierta por la textura con máxima resolución (784,404 textels);
- la segunda reúne a la malla de triángulos compuesta por 28,600 polígonos (el 10% de los polígonos representados en la anterior) sobre la que se mapea una textura de 245,717 texels, aproximadamente el 26 % de los texels originales;
- finalmente, la última representación reúne a la malla de triángulos anterior (28,600 polígonos) junto a una textura simple compuesta por 37,800 texels, aproximadamente el 4% de los texels originales.

Nótese que, si los recursos computacionales son críticos no es necesario representar las versiones más precisas: la segunda combinación agrupa versiones más livianas que agilizarán el proceso visual sin desmerecer la calidad de la representación buscada.

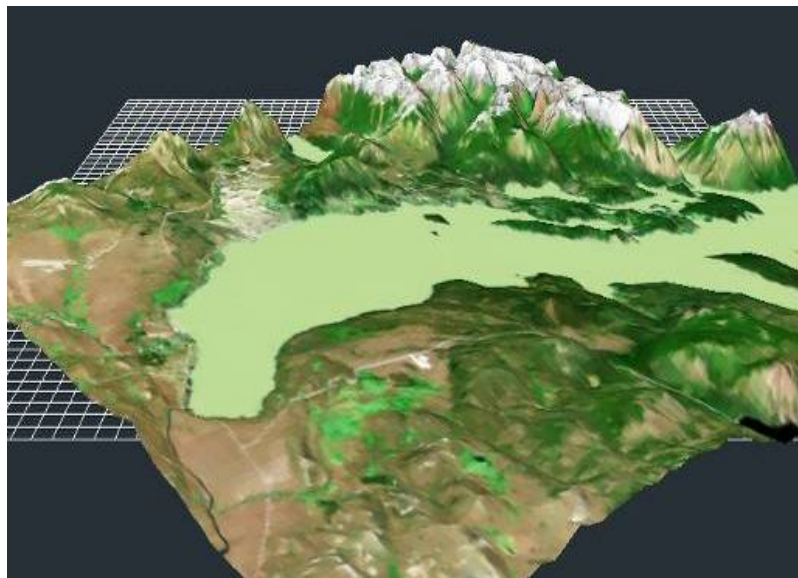
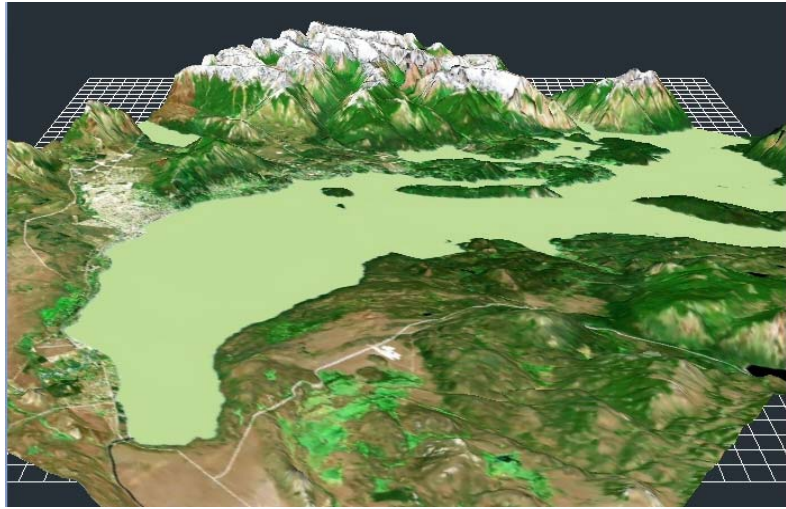


Figura 7 – Lago Nahuel Huapi: malla y textura con alta (a), mediana (b) y baja resolución (c).

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Básicamente, el interés de este trabajo es la visualización de extensas superficies terrestres cuando los recursos computacionales son críticos. Así, es necesaria la representación de versiones simplificadas de terrenos y texturas para agilizar los procesos visuales, las tasas de renderizado, etc. Con este objetivo, se reusa el algoritmo de simplificación poligonal que reduce el conjunto de vértices que definen al MDE originalmente y se lo aplica a la compresión de imágenes. Ahora, el proceso de descomposición del dominio se basa en la curvatura local o en la desviación estándar del color según se trate de modelos de elevación o imágenes satelitales. Tal algoritmo de descomposición construye en  $O(n \log n)$  dos jerarquías quadtrees: la restringida para la extracción de mallas conformes aproximadas y la no restringida que agrupa versiones comprimidas de la imagen satelital original.

Además, se presenta una heurística basada en el análisis multi-criterio que selecciona el par aproximado que asegure calidad visual aceptable para el conjunto de recursos disponibles. Está en análisis la evaluación de la calidad visual o distorsión introducida por cada aproximación como también los coeficientes de ponderación  $\alpha$  y  $\beta$ .

Más adelante, se piensa en realizar compresiones dinámicas según la posición de un observador que se desplaza en el escenario. Tales simplificaciones asegurarán una buena resolución en los alrededores del observador mientras que en sectores alejados no hará falta la precisión, pudiéndose representar con un mismo color, lo que simplificaría aún más la textura mapeada.

## REFERENCIAS

- [1] Hoppe, H. View-Dependent Refinement of Progressive Meshes. *Computers & Graphics. Proceedings of SIGGRAPH'97*, p.189-198, 1997.
- [2] Lindstrom, P., Koller, D., Ribarsky, W., Hodges, L., Faust, N., Turner, G. Real-Time, Continuous Level of Detail Rendering of Height Fields. *Computers & Graphics. Proceedings of SIGGRAPH'96*, 1996.
- [3] Gross, M., Staadt, O., Gatti, R. Efficient Triangular Surface Approximation using Wavelets and Quadtree Data Structure. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2(2) : 1-13, June 1996.
- [4] Pajarola, R. Large scale Terrain Visualization using the restricted quadtree triangulation. *Reporte interno 292 del Institute of Theoretical Computer Science. ETH Swiss Federal Institute of Technology*. Zurich, 1998.
- [5] Abásolo, M.J., De Giusti, A., Blat, J. Una Triangulación Jerárquica para Modelos Topográficos Multirresolución. *CACIC'99*, Tandil, Buenos Aires, Argentina, p. 26-30, Octubre de 1999.
- [6] Cifuentes, M.V., Dr.Vénere, M.J., Dr. Clause, A. Un algoritmo para la simplificación poligonal de modelos topográficos digitales. *33ª JAIIO, Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa*. Córdoba, desde el 22 al 24 de septiembre de 2004.
- [7] Cifuentes, M.V., Ing. D' Amato, J.P., Ing. García Bauza, C., Dr. Vénere, M.J., Dr. Clause, A. Remallado interactivo como método para la navegación eficiente de modelos topográficos. *MECOM 2005*. Buenos Aires, Noviembre de 2005.

- [8] Samet, H. The quadtree and related hierarchical data structures. *Association for Computing Machinery. Computing Surveys*, 16 (2):187-260, June 1984.
- [9] Ibaroudene, D, Demjanenko, V & Acharya, R. Adjacency algorithms for linear octree nodes. *Image and Vision Computing, Butterworth & Co Publishers Ltd.*, 8(2):115-123, May 1990.
- [10] Von Herzen, B. & Barr, A. Accurate triangulation of deformed, intersecting surfaces. *Computer Graphics , SIGGRAPH'87 Proceedings*, pp. 103-110, 1987.
- [11] Horbelt, S., Balmelli, L., Vetterli, M. Joint mesh and texture compression using marginal analysis. *Swiss Federal Institute of Technology*, 1015 Lausanne EPFL, Switzerland (2000).
- [12] Vénere, M.J., Cifuentes, M.V., D' Amato, J.P., García Bauza, C. Editor de escenarios para aplicaciones de Realidad Virtual. *34ª JAIIO, Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa*. Rosario, Septiembre de 2005.