

Simplificación Poligonal guiada por Máscaras Visuales

María V. Cifuentes^{1,2}, Juan P. D'Amato¹, Lucas Lo Vercio¹, Alejandro Clause¹

¹ PLADEMA, UNICEN, Pinto 399 (7000) Tandil, Argentina

² CIC-GBA, calle 526 entre 10 y 11 (1900) La Plata, Argentina

{mvcifuentes, juan.damato, lucaslovercio}@gmail.com

Resumen. La visualización interactiva en ambientes exteriores requiere de la simplificación poligonal de los modelos involucrados; proceso que introduce artefactos geométricos que degradan la calidad visual resultante. Maximizar la tasa de simplificación mientras se minimiza la degradación visual no resulta una tarea trivial. La idea es encontrar un balance entre la calidad visual y la conservación de la topología, notando una característica principal: una región escasamente iluminada reduce en apariencia la distorsión geométrica que una muy iluminada. En este contexto, el algoritmo propuesto para la simplificación de los objetos en el escenario exterior ha sido guiado primariamente por una métrica geométrica (curvatura local), y luego combinado con un criterio basado en la percepción visual que evalúa la influencia de la iluminación en cada elemento. La calidad y la robustez del indicador propuesto resultan de la medición del volumen encerrado entre las aproximaciones generadas y los modelos reales. La solución propuesta está concebida inicialmente para entornos donde el cambio de iluminación, y consecuente recálculo de la malla, es poco frecuente; permitiendo obtener mallas con una cantidad manejable de elementos y con un proceso de renderizado eficiente.

Palabras Clave: Modelos Digitales de Elevación, Visualización, Percepción.

1 Introducción

Los avances tecnológicos en telecomunicaciones, computación gráfica y multimedia posibilitaron la visualización, manipulación y transmisión de modelos tridimensionales voluminosos para la representación de escenarios exteriores. Existe una importante variedad de técnicas para el modelaje de objetos y de fenómenos naturales basadas en polígonos que proveen mecanismos concisos, eficientes, flexibles y controlables tanto para su especificación como para la animación. Una alternativa viable son las mallas de triángulos cuya problemática surge al evitar exceder las capacidades del hardware gráfico; objeto de simplificaciones, introducen artefactos visuales que deterioran la calidad visual.

Tanto la velocidad en el rendering como la calidad visual son dos requerimientos inherentes a cualquier aplicación de computers graphics. Estrategias como la inmersión de un observador, la selección del nivel de detalle, la inclusión del punto de vista [7, 12, 14, 18] y los modelos perceptuales usados para optimizar el muestreo en algoritmos de ray tracing [2] son, en cierta forma, métricas perceptuales offline que mejoran el rendering.

En aplicaciones de tiempo real basados en escenarios exteriores sobre las cuales generalmente se utilizan dichas mallas, tales como simuladores de vuelo o de navegación, la iluminación se mantiene prácticamente constante para ciertos intervalos de tiempo [15], pero es necesario disponer de mallas de pocos elementos, para poder priorizar el poder de cálculo para los modelos numéricos del movimiento de objetos en la escena y para la visualización de otros elementos complejos, como en [16].

Desde un punto de vista perceptual, las distorsiones percibidas por el observador dependen tanto de su ubicación como de las condiciones de luz imperantes. Nuestra propuesta se funda en que al observador no puede percibir exiguas alteraciones localizadas sobre áreas muy accidentadas y/o escasamente iluminadas. La rugosidad y la escasa iluminación ocultan ciertas desviaciones geométricas y constituyen un fenómeno perceptual de interés ya estudiado [3, 9].

Básicamente, nuestra motivación consiste en construir una máscara que identifique regiones donde las distorsiones geométricas producidas por la simplificación podrían ser casi invisibles y demostrar que la perturbación percibida es menos visible cuando el ruido es aplicado sobre regiones muy accidentadas y/o escasamente iluminadas. El indicador de error basado en la curvatura local propone que las zonas con cambios abruptos en la pendiente sean modelados con mayor cantidad de polígonos mientras que las regiones con cambios suaves puedan representarse con unos pocos polígonos. Además, el criterio de sombreado incrementará la simplificación debido a que las zonas menos iluminadas se modelarán con unos pocos polígonos mientras que las zonas muy iluminadas mantendrán la densidad de polígonos establecida por el criterio geométrico.

Por otra parte, es difícil cuantificar la fidelidad visual de la aproximación resultante del criterio propuesto debido a que el modelo poligonal original se sustituye por un modelo más simple con menos polígonos. Para obtener una evaluación factible del efecto de enmascaramiento, se simplificó un modelo de elevación real con diferentes valores de tolerancia para obtener el mismo error cuadrático medio en cada caso, este error refleja la cantidad total de energía adicional al ruido. En particular, se propone un algoritmo que mide la fidelidad geométrica en base al volumen de la distorsión generada por la simplificación. Tales medidas son necesarias en aplicaciones científicas, especialmente en medicina.

La siguiente sección describe el algoritmo bottom-up que simplifica un modelo digital de elevación en $O(n)$, siendo n la cantidad de cotas que lo definen. La sección 3 detalla el proceso de construcción de las máscaras visuales propuestas a partir del cálculo de la curvatura local y de la intensidad de iluminación en cada elemento de la aproximación. La sección 4 presenta el algoritmo para medir la robustez y la subjetividad de la evaluación del enmascarado visual mediante el error medio cuadrático. Finalmente la sección 5 ilustra una aplicación a la simplificación en las cuales nuestro estimador combinado de geometría e iluminación es usado para mejorar los resultados.

2 Simplificación Bottom-up

El algoritmo de simplificación implementado crea representaciones más simples de un terreno mediante un proceso bottom-up. Básicamente, el proceso aborda a la malla cuadrada de mayor resolución, una matriz bidimensional de curvaturas derivadas directamente de un campo escalar de alturas: el MDE. La aproximación base se logra consolidando de a cuatro, todas las regiones ortogonalmente adyacentes hasta que cumplan con un criterio de tolerancia permitido T . Con las sucesivas uniones se genera bottom-up la jerarquía de mallas con complejidades diferentes que representan el mismo terreno organizadas en un quadtree. Los nodos del árbol son cuadrados de longitud de lado 2^k , donde k identifica el nivel de refinamiento. De acuerdo a la estructura de bloques en el quadtree, cada cuadrado en la jerarquía poseerá un error determinado, que puede ser mayor o igual al error de todos sus descendientes [5].

En ciertas situaciones, el proceso de subdivisión adaptativa inserta vértices indeseables que ocasionan la formación de mallas no conformes (con la presencia de huecos). En particular, se mantiene la restricción de que todas las regiones quadtree ortogonalmente adyacentes difieran a lo sumo en un nivel de recursión reduciendo el conjunto de vértices problemáticos a sólo 15 situaciones posibles de sencillo reconocimiento [4].

Este algoritmo de recorrido tiene un costo proporcional a la cantidad de elementos de la malla (simplificar una malla de 10k triángulos tarda 250 ms), pero solo se invoca si cambian los parámetros de iluminación.

3 Construcción de Máscaras Visuales

3.1 Máscara Geométrica

Los algoritmos de simplificación son mayormente gobernados por criterios geométricos [1, 4, 7, 8, 10, 11, 13, 17], por lo que inducen una clase de efectos de suavizado en el modelo que le producen cierta degradación. Nuestro objetivo consiste en construir máscaras que oculten la degradación geométrica e identifiquen aquellas regiones en las cuales la distorsión sería casi imperceptible. El criterio o indicador de error geométrico implementado corresponde a la curvatura local de la región, que mide la desviación de la geometría intrínseca de esa superficie respecto a la geometría del plano (ver fig. 1). El indicador ha resultado conveniente para la simplificación de mallas poligonales que representan superficies topográficas y ha sido estudiado en [4].

Concretamente, nuestra propuesta presentada en [4] el tensor de curvatura en cada celda del campo escalar está dado por:

$$\kappa_{ij} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} (G_{x_{i+1,j}} - G_{x_{i-1,j}}) & (G_{y_{i+1,j}} - G_{y_{i-1,j}}) \\ (G_{x_{i,j+1}} - G_{x_{i,j-1}}) & (G_{y_{i,j+1}} - G_{y_{i,j-1}}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde Gx_{ij} y Gy_{ij} son las componentes del gradiente en cada dirección y pueden ser aproximadas eficientemente por:

$$Gx_{ij} = \frac{1}{2\Delta}(h_{i+1,j} - h_{i-1,j}) \quad \text{y} \quad Gy_{ij} = \frac{1}{2\Delta}(h_{i,j+1} - h_{i,j-1})$$

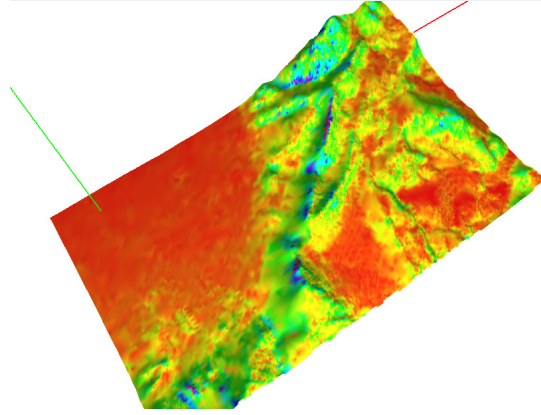


Fig. 1. Distribución del indicador geométrico basado en la curvatura local. Las regiones rojas son valores bajos y los verdes altos.

La norma de Frobenius del tensor presentado en (1) se calcula:

$$\kappa_{ij}^2 = (Gx_{i+1,j} - Gx_{i-1,j})^2 + (Gy_{i+1,j} - Gy_{i-1,j})^2 + (Gx_{i,j+1} - Gx_{i,j-1})^2 + (Gy_{i,j+1} - Gy_{i,j-1})^2$$

y puede ser usado para construir un indicador simple de curvatura local. Por ejemplo, la curvatura local acumulada de un dado conjunto S de vértices vecinos se define como:

$$K(S) = \sum_{(i,j) \in S} \kappa_{ij} \quad (2)$$

De lo que se concluye que, una región de alta curvatura indica un cambio abrupto de la dirección y tiene que ser modelada con más triángulos por unidad de área que una región de baja curvatura que permanece relativamente estable [4].

3.2 Máscara Perceptual

El objetivo principal es construir una aproximación poligonal conforme cuyo nivel de detalle sea indistinguible del modelo original. Si se simplifica la geometría con tolerancia nula ($T=0$), la aproximación poligonal no introduce distorsión con respecto a la original. Simultáneamente, se combina el criterio anterior con el basado en la percepción visual de modo que las regiones poco iluminadas se modelen con un nivel de detalle menor al otorgado por el criterio geométrico, mientras que las regiones

iluminadas lo conservan. Esta combinación de criterios mejora la etapa de rendering debido a que se elimina el detalle en los sectores sombreados.

El valor de sombreado en cada región quadtree resulta de aplicar el modelo de iluminación que calcula las intensidades de los vértices a partir del mapa de normales y una fuente de luz puntual (fig. 2). El mapa de normales define las normales por vértice del modelo original. Finalmente, la intensidad resultante en cada polígono resulta de la interpolación lineal de las intensidades de los vértices (fig. 3).

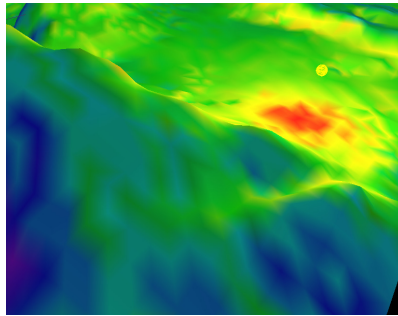


Fig. 2. Zoom en región indicando la norma del vector normal con respecto a la luz como un color (rojos positivos y azules negativos).

El indicador para un dado conjunto S de vértices vecinos queda planteado como:

$$T \leq K(S)I \quad (3)$$

donde T es la tolerancia permitida, K es la curvatura local e I la intensidad del polígono [6]. Nótese que, cuando cambia la localización de la fuente de iluminación deberá recalcularse el indicador planteado generando una aproximación conforme a los parámetros de luz cambiantes.

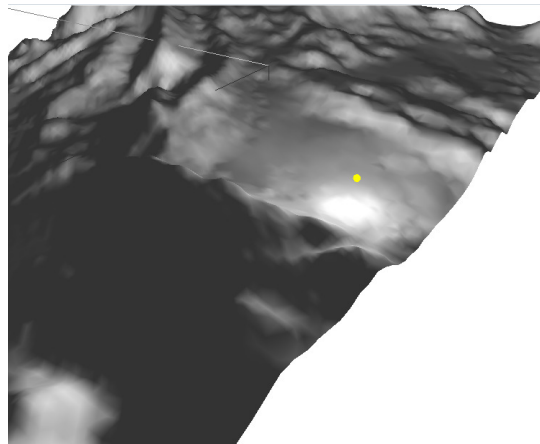


Fig. 3. Vista alejada de la malla sin textura con la fuente de luz.

4 Métrica Perceptual

El algoritmo para simplificar una malla poligonal puede esquematizarse en los siguientes cuatro pasos:

1. Comenzar con la grilla regular de mayor resolución y completar el nivel k de máximo refinamiento del quadtree. Calcular la curvatura acumulada para cada región quadtree de acuerdo a la ecuación (2)
2. Procesar el nivel $k-1$: agrupar de a cuatro, las regiones ortogonalmente adyacentes del nivel k según un dado indicador de error
3. Calcular la curvatura acumulada de las regiones del nivel $k-1$ como la suma de las curvaturas de sus cuatro descendientes en el nivel k
4. Continuar aplicando este procedimiento a cada nivel hasta que el indicador en todas las regiones sea menor que cierto límite predefinido en la ecuación (3).

Aplicando el criterio de simplificación propuesto es difícil cuantificar la fidelidad visual de la aproximación debido a que el modelo poligonal original se sustituye por un modelo más simple con menos polígonos. En Cifuentes et al [6] se implementó un algoritmo que mide la fidelidad geométrica en base al volumen de la distorsión generada por la simplificación. Este trabajo pretende demostrar que la perturbación percibida es menos visible cuando el ruido es aplicado sobre regiones más accidentadas. Para obtener una evaluación factible del efecto de enmascaramiento, se simplificó un modelo de elevación real con diferentes valores de tolerancia para obtener el mismo error cuadrático medio en cada caso, este error refleja la cantidad total de energía adicional al ruido.

5 Evaluación y Aplicación de la Máscara Perceptual

Se analizaron distintos experimentos con mallas de diferente complejidad. Todos los modelos fueron simplificados usando una única fuente de iluminación. La fig. 4 muestra la aplicación de ambos criterios a una misma topografía compuesta por 800000 triángulos obteniendo aproximaciones cercanas a los 35000 triángulos: basado en curvatura (ec.2) y curvatura combinada con el modelo de iluminación (ec.3). Nótese que, con el primer criterio las regiones montañosas se modelan con mayor cantidad de triángulos que las regiones planas. El criterio combinado (ec.3) redistribuye los triángulos, incrementando el detalle en las regiones con iluminación alta y reduciendo aquellas de iluminación baja, respectivamente.

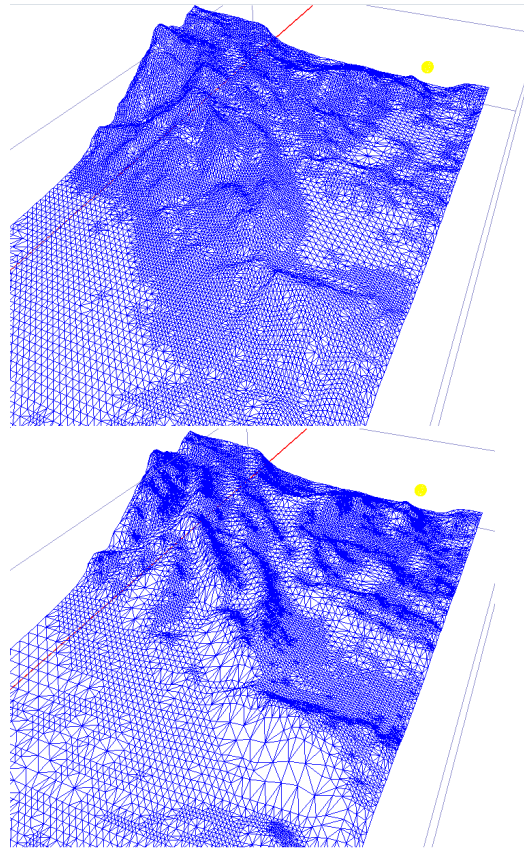


Fig. 4. Criterio de curvatura (arriba) y criterio combinado con la iluminación (abajo)

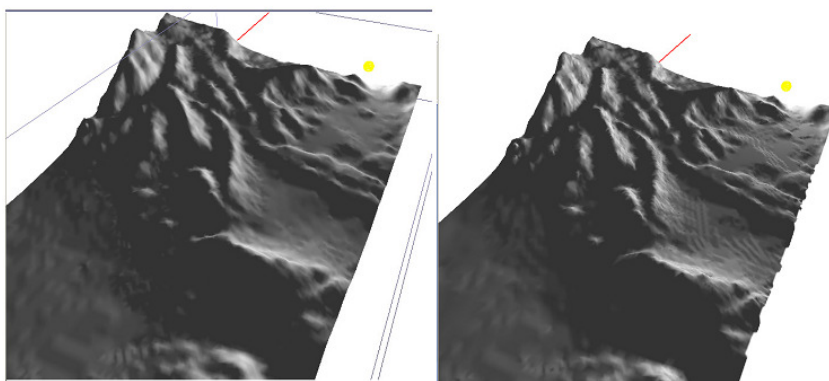


Fig. 5. Representación textura de las aproximaciones de la figura 4.

En Cifuentes et al [4], el criterio de curvatura permite simplificar una malla en un orden de 10:1. Añadiendo el criterio de iluminación, es posible obtener la misma relación conservando aún más los detalles, como se observa en la imagen a la abajo de la fig. 4 y en las representaciones texturadas de la fig. 5.

En el gráfico de la fig. 6 se observa que el criterio de Ec.3 siempre genera mallas con más triángulos para el mismo error volumétrico. A medida que aumenta la tolerancia del error, el criterio balancea mejor la diferencia, distribuyendo adecuadamente los elementos entre detalles y zonas oscuras, tal como se mostraba en la fig. 4.

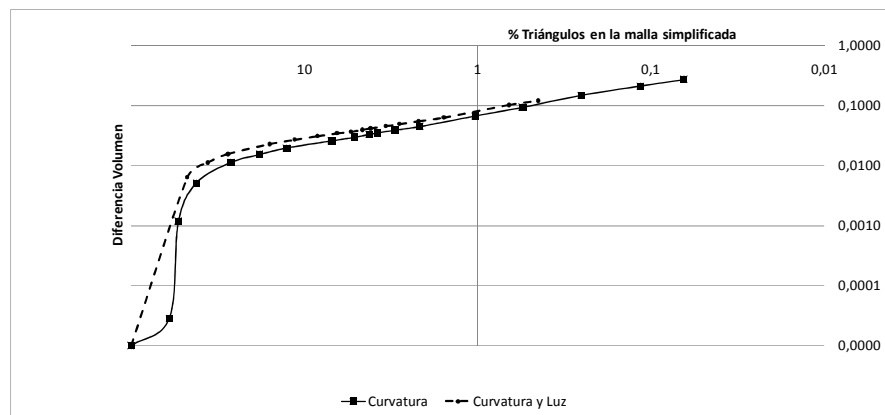


Fig. 6. Diferencia de volumen entre la malla original y la aproximada usando el criterio de curvatura y el combinado.

6 Conclusiones y Trabajos Futuros

La alta eficiencia que brindan las GPUs modernas, en contraste con el procesamiento cuasi-lineal de una CPU, marca un límite que define la viabilidad de aplicación de un algoritmo: a veces es conveniente visualizar triángulos de más, y no saturar la CPU. El algoritmo propuesto, que se ejecuta sobre CPU, claramente puede generar un cuello de botella en el proceso de rendering.

Pero la relación 10:1 de reducción de cantidad de elementos y los bajos tiempos de procesamiento relativos con respecto al tiempo final de render, indican que el algoritmo es viable para casos donde los parámetros de iluminación varían poco.

A su vez, esta estrategia es fácilmente combinable con estrategias dinámicas de simplificación, como son la clasificación geométrica por ángulo de vista, el uso de árboles B o la simplificación por distancia al punto de vista, pudiendo reducir aún más los tiempos de render.

Este trabajo nos ha permitido explorar una estrategia interesante para la simplificación de mallas regulares de altura; como futuros trabajos se propone extender el mismo concepto a mallas no regulares y no orientadas.

Referencias

1. Álvarez, R., Noguera, J.V., Tortosa, L. and Zamora, A.: A mesh optimization algorithm based on neural networks, *Information Sciences* 177 (23), pp. 5347–5364, (2007)
2. Bolin, M., Meyer, G. : A perceptually based adaptive sampling algorithm, *ACM SIGGRAPH*, pp. 299–309, (1998)
3. Campbell, R., Kulikowski, J. : Orientation selectivity of the human visual system., *Journal of Physiology* 187, p.p. 437–445, (1966)
4. Cifuentes, M, Vénere, M., Clausse, A.: Interactive Remeshing for large landscapes, *Latin American Applied Research*, ISSN: 0327-0793, en prensa, (2009)
5. Cifuentes, M, Dottori, J., Lo Vercio, L., Clausse, A.: Visualización interactiva anisotrópica de modelos topográficos. *Mecánica Computacional V.26*, ISSN 1666-6070, p. 739-746, (2007)
6. Cifuentes, M, D’Amato, J., Lo Vercio, L., Clausse, A.: Simplificación de topografía de áreas imperceptibles. *Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa*, (2009)
7. Cohen, J., Olano, M., Manocha, D.: Appearance preserving simplification, *Proceedings of SIGGRAPH’98*, vol. 32, pp. 115–122, (1998)
8. Garland, M., Heckbert, P.S.: Simplification using quadric error metrics, *Proceedings of SIGGRAPH’97*, vol. 31, pp. 209–216, (1997)
9. Harmon, L., Julesz, B. : Masking in visual recognition: effects of two-dimensional filtered noise, *Science* 180, p.p. 1194–1197, (1973)
10. Hoppe, H.: Progressive meshes, *SIGGRAPH’96*, *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, New York, USA, pp. 99–108, (1996)
11. van Kaick, O.M., Pedrini, H.: A comparative evaluation of metrics for fast mesh simplification, *Computer Graphics Forum* 25, pp. 197–210, (2006)
12. Luebke, D., Hallen, B.: Perceptually-driven simplification for interactive rendering, *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, London, UK, pp. 223–234, (2001)
13. Lindstrom, P., Turk, G.: Fast and memory efficient polygonal simplification, *Proceedings of IEEE Visualization*, pp. 279–286, (1998)
14. Lindstrom, P., Turk, G.: Image-driven simplification, *ACM TOG* 19 (3), pp. 204–241, (2000)
15. Vénere M., Cifuentes M.V., D’Amato J.P., García Bauza C., “Editor de Escenarios para Aplicaciones de Realidad Virtual”. *VI Simposio Argentino de Tecnología en Computación* (2005).
16. Vénere M., Boroni G., “Un simulador distribuido para entrenamiento de operarios”. *VIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, CACIC*, 2002.
17. Vo, H.T., Callahan, S.P.: Streaming simplification of tetrahedral meshes, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (1), pp. 145–155, (2007)
18. Zhang, E. and Turk, G.: Visibility-guided simplification, *Proceedings of IEEE Visualization* 31, pp. 267–274, (2002)