

# Desarrollo de un Sistema de Visualización para la Planificación Minera

Leonardo Soto  
Depto. de Ingeniería de Sistemas  
Universidad de Talca  
[lesoto@utalca.cl](mailto:lesoto@utalca.cl)

Ricardo Sánchez  
Depto. de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Concepción  
[risanchez@telsur.cl](mailto:risanchez@telsur.cl)

Jorge Amaya  
Centro de Modelamiento Matemático  
Universidad de Chile  
[jamaya@dim.uchile.cl](mailto:jamaya@dim.uchile.cl)

## Resumen

El desarrollo de sistemas de visualización en diversos dominios de aplicación, favorece el avance tanto en las aplicaciones como en la propia disciplina de visualización. En el presente trabajo se muestra la implementación de un sistema de visualización para planificación minera, analizándolo en el contexto de un modelo de referencia. El software construido utiliza diferentes representaciones y filtros interactivos que permiten a los usuarios estudiar los planes establecidos en forma integrada con la información del recuso minero, facilitando la interpretación y comunicación de resultados.

Palabras Clave: Visualización, planificación minera, computación gráfica, interfaz humano-computador.

## 1. Introducción

Visualización es el proceso a través del cual se construyen representaciones visuales interactivas de datos. Se busca utilizar nuestro sistema visual como medio para explorar conjuntos de datos y facilitar la extracción de información. Los avances en esta disciplina están muy ligados a las aplicaciones [1], cuyos desafíos son los que en definitiva promueven el desarrollo de nuevas técnicas.

La planificación minera es un interesante dominio de aplicación para la visualización, debido a la gran cantidad de datos multivariados que se deben manejar y a la naturaleza compleja del proceso. En este contexto, el desarrollo de sistemas de visualización favorece el desarrollo de ambas disciplinas, ya que se provee de herramientas que facilitan el estudio y la comunicación de planes mineros, y por otro lado, los requerimientos particulares de la planificación minera desafían el estado del arte de la visualización. En la exploración petrolera, otro interesante dominio de aplicación, la visualización ha tenido un impacto considerable [13].

En las siguientes secciones se presentan los desafíos planteados por la planificación minera, un modelo de referencia para el proceso de visualización [3] y su aplicación en el análisis y diseño de un sistema de visualización desarrollado para la planificación minera.

## 2. Desafíos Planteados por la Planificación Minera

Planificación minera es la disciplina que se encarga de la gestión de los procesos involucrados en la explotación de recursos mineros. Su desarrollo se ha visto favorecido por las tecnologías de la información, que han potenciado la convergencia de la administración estratégica y la optimización minera [12]. Se debe notar que para valorar un determinado yacimiento no basta con establecer la riqueza de los minerales presentes, se debe elaborar un plan de extracción a través del cual se evalúa la factibilidad técnica y económica de explotarlo.

En términos prácticos, el principal desafío que se enfrenta es establecer el plan de extracción óptimo para un determinado yacimiento, considerando restricciones de carácter técnico, económico y estratégico. La gran cantidad de variables involucradas, algunas de las cuales varían en tiempo de acuerdo al comportamiento de los mercados o debido a cambios tecnológicos, y sus interrelaciones generan un sistema complejo. Estos factores dificultan el diseño del plan minero, el cual se rige por dos objetivos primordiales: maximizar el valor actual neto (VAN) de las utilidades y controlar el riesgo del proyecto de explotación.

El yacimiento se divide lógicamente en bloques tridimensionales, cada uno de los cuales tiene asignado coordenadas espaciales, tamaño, densidad y leyes de distintos minerales. Estos forman el denominado modelo de bloques, que es desarrollado por geólogos y geoestadísticos en base a sondeos realizados en terreno. La importancia de los datos almacenados en este modelo es enorme, ya que a partir de ellos se estiman los costos y las utilidades esperadas, ambos elementos fundamentales en la elaboración del plan minero. El objetivo de la planificación es optimizar la secuencia en que son extraídos los bloques de la mina, maximizando los beneficios y limitando el riesgo.

El desarrollo de herramientas de visualización debe considerar una serie de características del proceso de planificación minera que plantean importantes desafíos de diseño e implementación:

- Necesidad de integrar información técnica, económica y estratégica en el diseño del plan minero.
- Participación de diversos especialistas en el proceso: geólogos, geoestadísticos, ingenieros en minas, metalúrgicos y gestores.
- Manejo, análisis y comunicación de la información contenida en grandes conjuntos de datos multivariados, y su utilización durante la toma de decisiones.
- Inexistencia de medios efectivos y eficientes para comunicar e interactuar con el plan de extracción generado.
- Necesidad de realizar análisis de sensibilidad de los planes obtenidos, para acotar el riesgo de que los cambios en el precio de mercado de los minerales puedan comprometer el éxito del proyecto de explotación.
- Necesidad de mostrar, en forma integrada, información que respalde la planificación realizada y que permita comparar planes de extracción.

### 3. Fundamentos de Visualización

Visualización es el proceso a través del cual se construyen representaciones visuales interactivas de datos, con el objetivo de que su manipulación facilite la extracción de información y el entendimiento de los procesos que los generan. La motivación para utilizar una codificación gráfica se basa en la utilización del gran ancho de banda de nuestro sistema visual y de las capacidades de procesamiento paralelo que este posee, para la detección de patrones en los datos. La interacción del usuario es un elemento central en los sistemas de visualización, ya que le permite dirigir el proceso hacia la obtención de ayudas visuales que asistan la realización de sus tareas [7].

A continuación, se utiliza un modelo de referencia simple para describir las etapas del proceso de visualización [2], [3]. Sin embargo, se debe mencionar que existe en la literatura un modelo más completo que, basado en operadores, facilita el análisis y clasificación de técnicas [4], [5]. El proceso de visualización puede entenderse como una serie de transformaciones que comienzan con un conjunto de datos y finalizan con una representación visual que los codifica. En un sistema de visualización, el usuario puede controlar los parámetros de dichas transformaciones y de ese modo explorar distintos aspectos de los datos (figura 1).

Se identifican tres tipos de transformaciones, que ocurren en etapas consecutivas: transformaciones de datos, transformaciones visuales y transformaciones de vista. La entrada al proceso es el conjunto de datos en bruto, los cuales se organizan en tablas relacionales para luego aplicar transformaciones de datos, como selección de variables y filtros por rango de valores. Una vez definido el subconjunto de datos a utilizar, se emplean transformaciones visuales que generan una representación computacional de las estructuras visuales que codifican la información contenida en los datos. Por último, se utilizan algoritmos de computación gráfica para desplegar las vistas necesarias de las estructuras visuales obtenidas anteriormente.

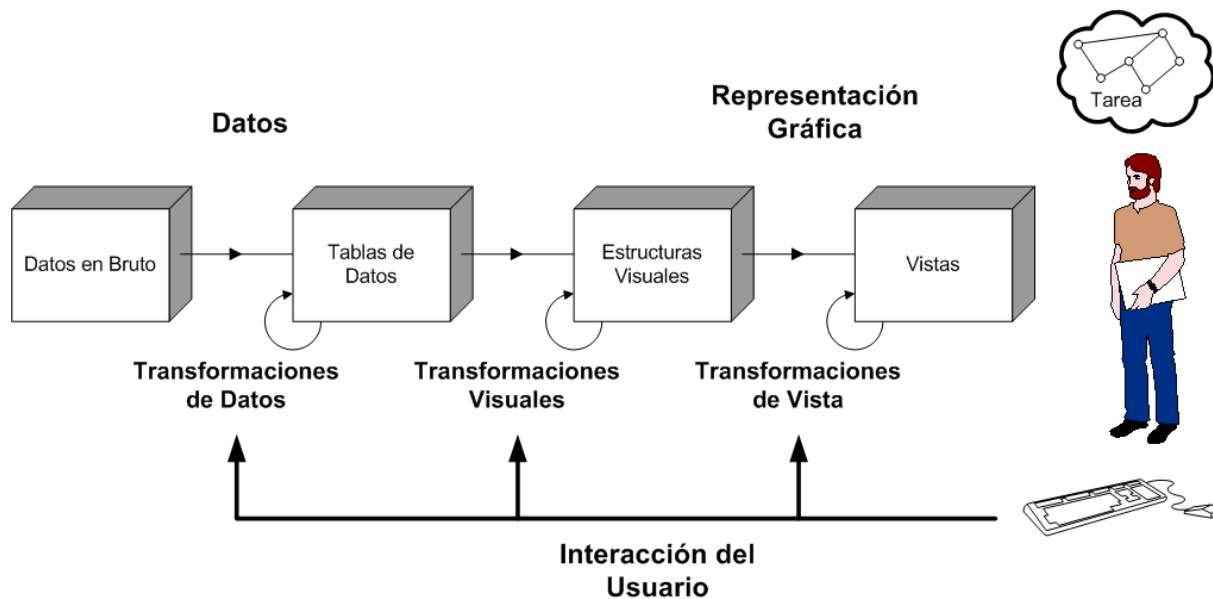


Figura 1. Modelo de Referencia (Card et al [3])

Las *transformaciones de datos* pueden ser de dos tipos básicos: conversión de formatos particulares a tablas de datos y manipulación de dichas tablas. En primer lugar, los conjuntos de datos, generalmente multivariados y de gran tamaño, se encuentran en formatos específicos del dominio de aplicación y deben ser organizados con una estructura relacional para lograr mayor flexibilidad. Luego, contando con tablas de datos, se pueden aplicar distintas transformaciones que actúan sobre los valores de las tablas o sobre sus estructuras (eliminación de variables, derivación de nuevas variables, clasificación, ordenamiento, etcétera).

El centro del proceso de visualización son las *transformaciones visuales*, ya que, mediante ellas los datos adquieren una forma gráfica. Las estructuras visuales son símbolos emplazados en un sustrato espacial y que poseen propiedades gráficas, las cuales son moduladas para codificar información. Ejemplo de estructuras visuales son volúmenes, polígonos, superficies implícitas, íconos, curvas y puntos; por otro lado, entre las propiedades gráficas de éstas se encuentran color, transparencia, textura, forma, tamaño, orientación y posición, siendo algunas más efectivas que otras para la codificación de determinados tipos de datos [8]. El principal desafío en el desarrollo de aplicaciones es encontrar una representación efectiva y eficiente para representar los datos que se desean visualizar. Cabe destacar que después de realizar las transformaciones visuales, las estructuras visuales generadas se encuentran en forma no gráfica: sólo se dispone de las estructuras de datos en las cuales se almacena la información geométrica y de conectividad, y las propiedades gráficas de cada estructura visual.

Las *transformaciones de vista* permiten generar diferentes vistas de las estructuras visuales. Este tipo de transformación involucra rotaciones, traslaciones, acercamientos, recorte geométrico y distorsiones. Estas transformaciones son aplicadas durante la proyección de las estructuras visuales en imágenes, utilizando algoritmos de computación gráfica. Al mismo tiempo, se puede incorporar la consulta de información detallada de los datos en forma gráfica, para lo cual es necesario invertir la serie de transformaciones hasta llegar al dato en la tabla relacional.

Finalmente, la interacción del usuario en un sistema de visualización permite controlar los parámetros de las transformaciones en distintos niveles, con el objetivo de obtener las ayudas visuales que asistan la realización de las tareas requeridas [7]. El uso de herramientas de visualización favorece la realización de tareas cognitivas complejas, como la búsqueda de información, el descubrimiento científico, la toma de decisiones y la explicación.

#### 4. Descripción del Sistema Desarrollado

Se desarrolló un sistema de visualización denominado Sistema de Visualización para la Planificación Minera (SVPM). La metodología de desarrollo se basó en la elaboración de prototipos incrementales, los cuales permitieron explorar los requerimientos de la aplicación [6] y establecer las técnicas de visualización más adecuadas para las tareas de planificación. Se trabajó sobre una plataforma PC con Windows 2000-XP y las herramientas de desarrollo utilizadas fueron C++ Builder de Borland y la biblioteca VTK [9], [10], [11]. La figura 2 muestra imágenes obtenidas con el software implementado.

El desarrollo del software se realizó en estrecha colaboración con el grupo de planificación minera del Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, IM2-CODELCO, lo cual permitió orientar su construcción hacia el usuario final. La evaluación continua, provista por usuarios de distintas disciplinas involucradas en el proceso de planificación, permitió obtener un prototipo funcional exitoso. Actualmente, este sistema de visualización se utiliza en IM2 como una herramienta importante en el proceso de generación-evaluación de planes mineros, apoyando un análisis integrado con información del recurso minero, y asistiendo la preparación de presentaciones.

A continuación, utilizando el modelo de referencia descrito en la sección anterior [3], se describe el sistema implementado (ver tabla 1). En primer lugar, se establecen las transformaciones de datos disponibles, las que generan como producto los datos almacenados en las estructuras de datos provistas por VTK. Estas estructuras están organizadas en función de tres elementos: la geometría de los datos, la conectividad entre los elementos geométricos que definen celdas de datos y los atributos asociados a cada celda. Utilizando esta información se generan las estructuras visuales a través de transformaciones visuales. Finalmente, las transformaciones de vista proveen los medios necesarios para interactuar con las estructuras visuales, al controlar la forma en que éstas se convierten en imágenes bidimensionales.

Transformaciones de Datos	Transformaciones Visuales	Transformaciones de Vista
Transformación de archivos ASCII a estructuras de datos en VTK	Generación de bloques	Rotación
Selección de variables	Extracción de isosuperficies	Traslación
Filtro de datos según rango de valores	Generación de planos cortantes	Acercamientos
	Generación de superficie topográfica	Filtros geométricos
		Consulta de datos detallados

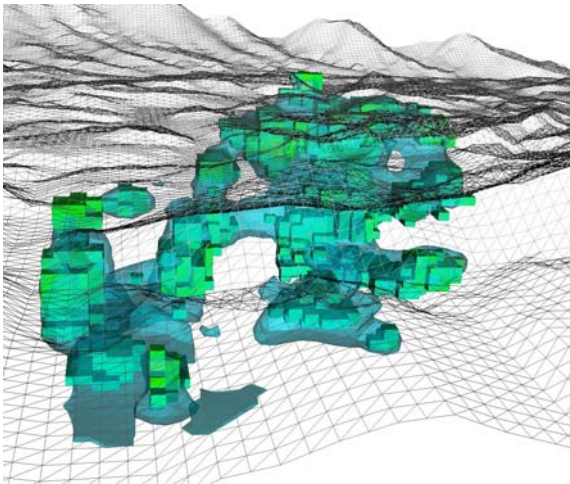
Tabla 1. Transformaciones implementadas en el sistema de visualización desarrollado

##### a) Transformaciones de Datos

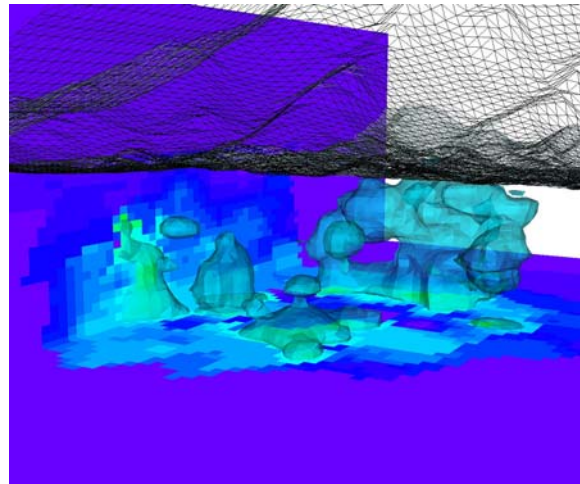
*Transformación de archivos ASCII a estructuras de datos en VTK:* Los datos del modelo de bloques y de la secuencia se encuentran almacenados en un archivo ASCII, donde cada fila representa un bloque y las columnas contienen la información asociada: coordenadas (x,y,z), densidad, ley de varios minerales y periodo de extracción. Se incorporó un archivo descriptor del conjunto de datos, ya que distintos modelos pueden presentar diferentes variables y es necesario conocer la metadata asociada.

*Selección de Variables:* Generalmente, el interés de los planificadores se encuentra sólo en de las algunas variables contenidas en el archivo original. Por este motivo y en pro de la eficiencia, se pide al usuario seleccionar las variables que desea utilizar, las que serán almacenadas en las estructuras de datos proporcionadas por VTK.

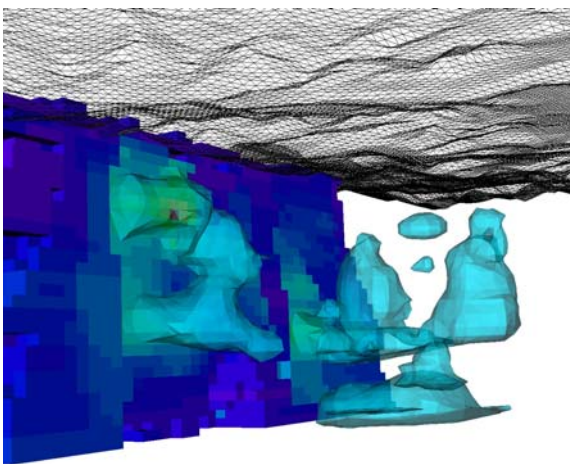
*Filtro de datos:* El usuario indica cual variable será utilizada como filtro de datos. Un filtro de datos permite restringir la representación gráfica para mostrar sólo los elementos que se encuentran dentro de un rango de valores de una variable particular. Este tipo de herramienta es de gran utilidad ya que permite la exploración de los datos al variar en forma interactiva el rango de valores de interés.



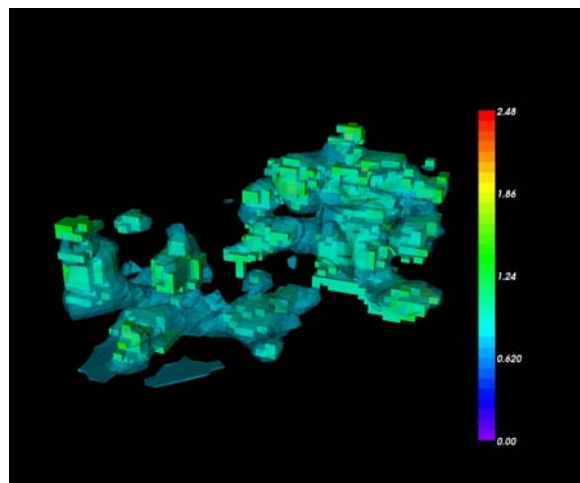
(a) Topografía, isosuperficie 0.8% de cobre y bloques superiores a ley de cobre 1%.



(c) Isosuperficie 0.8% de cobre y planos cortantes. Color indica concentración de cobre.



(b) Isosuperficie 0.8% de cobre y bloques restringidos por coordenada del eje x.



(c) Isosuperficie 0.8% de cobre y bloques superiores a ley 1%. Barra de colores según ley de cobre.

Figura 2. Imágenes obtenidas con el sistema desarrollado (SVPM)

## b) Transformaciones Visuales

*Generación de bloques:* En el modelo de bloques, estos se describen por la posición de su centro geométrico y su tamaño (definido en forma global). A partir de estos datos, se construye la representación gráfica del modelo, para lo cual es necesario generar los polígonos que componen los bloques. Además, se debe determinar el color asociado a cada bloque, el cual se utiliza para codificar la variable que el usuario desee estudiar. Para entender el significado de la codificación, se anexa una escala de colores numerada.

*Extracción de isosuperficies:* Se recorre el volumen de datos buscando superficies sobre las cuales una variable cualquiera presenta un determinado valor. La superficie divide el espacio en dos zonas, en el interior de la isosuperficie la variable de interés se encuentra sobre el isovalor y en el exterior se encuentra bajo dicho valor. Esta estructura visual ayuda a entender la distribución del recurso minero y se puede combinar con la representación de bloques.

*Generación de planos cortantes:* Se generan planos alineados con los ejes coordenados con los cuales se muestrea el volumen de datos. Los planos permiten reducir la dimensión del problema tridimensional a dos dimensiones, evitando los problemas de oclusión de datos.

*Generación de superficie topográfica:* Adicionalmente al modelo de bloques y la secuencia, es posible contar con información topográfica que se puede combinar con las representaciones anteriores. Los datos topográficos están disponibles como puntos de altura ubicados en el plano latitud - longitud. Luego, estos puntos aislados se utilizan para generar una malla de elementos triangulares mediante el algoritmo de triangulación de Delaunay. Finalmente, se calculan las normales promedio en los vértices de los triángulos para generar una representación de buena calidad gráfica.

## c) Transformaciones de Vista

*Transformaciones geométricas:* En computación gráfica rotaciones, traslaciones y acercamientos se conocen como transformaciones geométricas y son elementos estándar de las aplicaciones. Desde el punto de vista de la interacción, proveen un medio de manipulación mediante el cual se pueden observar modelos desde distintas posiciones, facilitando el entendimiento de la geometría estudiada.

*Filtros geométricos:* El denominado filtro geométrico permite limitar la representación del modelo de bloques, de modo que incluya sólo aquellos bloques cuyas posiciones se encuentran dentro de un rango de coordenadas. Esto permite lidiar con la complejidad tridimensional de los modelos, en particular con el problema de oclusión de bloques al representarlos como tales.

*Consultas de datos detallados:* Esta herramienta permite consultar visualmente los atributos asociados a un bloque. El usuario del sistema presiona la tecla 'p' con lo cual se ejecuta un método que invierte las transformaciones hasta llegar a la tabla de datos y entrega el identificador del elemento que se ha seleccionado. Luego se despliegan todos los atributos asociados a ese bloque, incluyendo posición y leyes de minerales.

## 5. Discusión y Trabajos Futuros

La utilización de sistemas de visualización apoya el trabajo de planificación minera, a través de herramientas que permiten interactuar con el modelo de bloques del recurso y analizar en forma gráfica el plan minero. Además provee un poderoso medio de comunicación para los resultados del proceso de planificación, al integrar información del recurso minero y del plan de extracción.

Tradicionalmente se han considerado dos áreas: visualización científica y visualización de información. La diferenciación radica en que la primera se asocia a datos que poseen inherentemente información espacial, por lo cual la representación geométrica es más directa, en cambio visualización de información trabaja con datos más abstractos, que no son intrínsecamente espaciales. Sin embargo, tal diferencia resulta artificial en dominios de aplicación que requieren ambos enfoques.

La representación del modelo de bloques y su estudio mediante planos cortantes e isosuperficies constituye un buen punto de partida, pero se deben diseñar estructuras visuales que se abstraigan de las coordenadas espaciales y faciliten el estudio de otras relaciones en los datos, en particular para estudiar y comunicar en forma eficiente la secuencia de extracción planificada.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo de planificación minera del Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, IM2-CODELCO, la posibilidad de desarrollar el software SVMP en interacción directa con especialistas en planificación minera.

## 7. Referencias

- [1] Alex Pang, Hans-Georg Pagendarm, "Visualization for Everyone", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 4, 1998, pp. 47-48.
- [2] Stuart K. Card, Jock Mackinlay, "The Structure of the Information Design Space", *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'97)*, Phoenix, Arizona, 1997, pp. 92-99.
- [3] Stuart K. Card, Jock Mackinlay, Ben Shneiderman, "Readings in Information Visualization: Using Vision to Think", Morgan Kaufmann, San Francisco, USA, 1999.
- [4] Ed H. Chi, John T. Riedl, "An Operator Interaction Framework for Visualization Systems", *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'98)*, North Carolina, 1998, pp. 63-70.
- [5] Ed H. Chi, "A Taxonomy of Visualization Techniques Using Data State Reference Model", *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'00)*, Salt Lake City, Utah, 2000, pp. 69-75.
- [6] David L. Kao, Kwan-Liu Ma, "The Life Cycle of a Visualization Case Study", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 20, No. 5, 2000, pp. 29-31.
- [7] Mei C. Chuah, Steven F. Roth, "On the Semantics of Interactive Visualizations", *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'96)*, San Francisco, California, 1996, 29-36.
- [8] Collin Ware, "Information Visualization: Perception for Design", Morgan Kaufmann, San Francisco, USA, 2000.
- [9] William Schroeder, Lisa Avila, William Hoffman, "Visualizing with VTK: A Tutorial", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 20, No. 5, 2000, pp. 20-27.
- [10] William Schroeder, Ken Martin, Bill Lorensen, "The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3-D Graphics", Prentice Hall, 2<sup>nd</sup> edition, 1997.
- [11] William Schroeder, K. Martin, Lisa S. Avila, C. Charles Law, "The Visualization Toolkit User's Guide, Version 4.0", Kitware, version 4.0, 2001.
- [12] David Whittle, "Strategic Mine Planning and a Decision-making Behaviour Model", *Proceedings of the Whittle North American Strategic Mine Planning Conference*, Colorado, USA, 2000.
- [13] Michael J. Potel (ed), Ben Delaney, "VizSim Technology Helps Find Oil Faster", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 19, No. 2, 1999, pp. 10-16.