

LA CIENCIA, EL TRAZADO DE RAYOS Y EL UNIVERSO VIRTUAL

Juan A. Madrid González

Depto. de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE

Km. 107 Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C.

E-mail: jmadrid@cicese.mx

RESUMEN

El vertiginoso avance de las capacidades de la computación ha permitido no sólo poder almacenar grandes volúmenes de datos, sino operar con ellos a velocidades que permiten la obtención y el análisis de resultados en tiempos relativamente cortos. Hace algunos años, contar con una PC con 400 Mbytes de memoria en el disco duro y ocho para la memoria de acceso, era más que suficiente para muchos propósitos científicos. En la última década, el desarrollo en los campos de creación de imágenes y realidad virtual ha permitido la representación visual y la simulación de fenómenos muy complejos, tanto estáticos como dinámicos, mediante imágenes de alta calidad generadas por diferentes métodos, entre los cuales el más importante, si no el más rápido, es el trazado de rayos. Como un resultado, fenómenos que no son directamente observables pueden ser evaluados y usados en un sentido formal. La aplicación de estas nuevas capacidades plantea la necesidad de computadoras de gran memoria, tanto en el cpu como de acceso, y de gran rapidez. Cuando estas representaciones son animadas y los objetos que contienen obedecen las leyes de la física y el usuario puede interactuar con ellos y hacer que interactúen entre sí, hablamos de “*realidad virtual*”. La realidad virtual permite la representación de cualquier fenómeno natural, por complejo que este sea, pagando la cuota ineludible de la dimensión del programa, el manejo de grandes cantidades de datos y el tiempo de elaboración de las imágenes. En esta elaboración, el color es una variable que se combina de acuerdo a una serie de reglas llamadas “*modelo de color*” y que puede ser usada cuantitativamente, proveyendo un medio para el análisis de alta resolución de una variedad de fenómenos.

INTRODUCCIÓN

Tanto en la ciencia básica como en la ciencia aplicada, una gran parte de la información que conduce al cuestionamiento de un fenómeno, así como a las ideas que pueden generar explicaciones plausibles se obtiene principalmente por la vía visual, es decir, por cómo se ve lo que se ve. La información visual domina toda la información sensorial que procesamos como seres humanos pensantes (probablemente si Newton no hubiera visto caer aquella manzana de cualquier manera habría descubierto la ley de gravitación, pero haberla visto caer seguramente le ayudó a comprender el fenómeno). La capacidad de visualización es muy importante, en particular, para algunas disciplinas que pretenden explicar lo que no se puede ver. En este sentido, el trabajo del geólogo, por ejemplo, es esencialmente una aplicación integral de la teoría inversa: de lo que se ve en la superficie de la tierra se pretende inferir no solamente qué hay en su interior, sino cómo es y aún más, cómo se formó y cómo está evolucionando. Para lograr esto, el geólogo debe echar mano de la geofísica, la geoquímica, la física de las rocas y muchas otras cosas más, pero lo que decide qué rumbo debe tomar inicialmente, es lo que ve: su dimensión, su geometría, su textura. Así, por ejemplo, si una buena fotografía aérea muestra una zona peculiar, es posible tomar la decisión, primero, de visitar el lugar y hacer una inspección visual y pruebas *in situ*, y posteriormente de colocar sensores que registren el o los datos que interesen, o tomar muestras para el laboratorio. Finalmente, la fotografía misma podría ser analizada de diferentes maneras para hacer inferencias de tipo científico.

En muchas situaciones no es posible tener acceso visual directo a un fenómeno dinámico o estático de interés; por ejemplo, el fondo del mar es accesible sólo hasta cierto límite, y aún dentro de este límite no es directa o fácilmente visible. Otro ejemplo es la topografía de una región. Aparatos como el sonar o el radar pueden producir imágenes del fondo marino o de la superficie continental u oceánica usando rayos reales, es decir, emitiendo una onda de alta frecuencia y recogiendo sus ecos para interpretarlos en términos de distancia y tiempo. En el caso de la topografía, el lugar del sonar estaría ocupado por un avión con un equipo sofisticado de fotografía, radar, o, en la actualidad, por un satélite, o una constelación de ellos (Leick, 1990). En cualquiera de estos casos, el objetivo final es la imagen, ya sea en una, dos, o varias frecuencias. Esta imagen puede ser analizada por una variedad de métodos que van desde las transformaciones más sencillas, como escalamientos, traslaciones y rotaciones (animadas o estáticas) con diferentes tipos de iluminación, hasta los más complejos y formales métodos interferométricos y de Fourier.

GENERACIÓN DE IMÁGENES

IMÁGENES FOTORREALISTAS

En un trabajo anterior (Madrid, 1997), mencionamos que una de las aplicaciones más recientes de la teoría de rayos y en particular del trazado de rayos es la producción de imágenes fotorrealistas en una computadora (Hall y Donald, 1983). La importancia de la visualización en muchas disciplinas es tan

grande que se ha hecho un gran esfuerzo para desarrollar métodos para producir imágenes virtuales de una calidad tan alta, que distinguirlas de fotografías verdaderas es un verdadero reto. Dichas imágenes, que reciben el adjetivo de "fotorrealistas", pueden elaborarse de la pura imaginación personal para crear fantasías pictóricas, o pueden representar algún fenómeno, o un conjunto de datos reales asociados a un problema específico y colectados previamente por algún método o generados en la computadora usando algún tipo de teoría. "Un problema específico" es un término lo suficientemente vago como para indicar que nos referimos a cualquier cosa, a todo. La pretensión es que se puede representar cualquier objeto (Kay y Kajiya, 1986) o conjunto de objetos, estáticos o dinámicos. Podemos igualmente reproducir y representar el movimiento de una membrana forzada de área circular o cuadrada sujeta a condiciones de frontera rígidas o libres, o la elevación del terreno, la distribución de velocidades de ondas sísmicas en la tierra, las corrientes oceánicas, el flujo de calor en una barra de metal sujeta a un gradiente de temperatura, o el movimiento del suelo durante un terremoto.

La creación de una imagen virtual fotorrealista requiere de los siguientes elementos virtuales (que existen dentro del cpu): una cámara fotográfica, una fuente de luz y los objetos del mundo que pongamos en el espacio virtual de trabajo. Además, se requieren las leyes de la óptica, ya que la simulación de una fotografía es en esencia la reproducción del fenómeno real: las fuentes de luz emiten rayos en todas direcciones que se reflejan, se refractan y se difractan, creando sombras, combinaciones de colores y toda clase de efectos ópticos que permiten la reproducción fiel de la realidad. A esto, se puede añadir la condición de que todos los objetos deben obedecer las leyes de la mecánica y entonces podemos hacer que los objetos virtuales se comporten de una forma real e interaccionen entre sí y con el medio virtual correctamente. Este proceso puede requerir de muchos millones de millones de operaciones de punto flotante, lo cual implica una buena cantidad de tiempo, que puede ser del orden de minutos o de semanas. Este tiempo depende del método usado, de la complejidad de la o las imágenes a ser creada(s) y de la rapidez de la computadora.

Existen programas comerciales de graficación que realizan muchas funciones similares. Las versiones nuevas de programas como el Surfer o el Matlab pueden producir imágenes tridimensionales de distribuciones de datos, como superficies de nivel (topografía y batimetría), permiten controlar la iluminación y el color y aún pueden producir animaciones simples, pero su rango de acción es limitado. Otros programas simulan los efectos tridimensionales y las animaciones por medio de transformaciones en el plano. Entre estos sobresale el pseudo-trazador de rayos RADIANCE. Este software, que se basa en una técnica llamada "radiosidad" (radiosity), es un conjunto de programas para el análisis y la visualización de la iluminación en el diseño. Sus archivos de entrada especifican la geometría de una escena, los materiales, las fuentes de luz, la hora, la fecha y las condiciones del cielo para cálculos diurnos. Las cantidades calculadas incluyen parámetros como la radiancia

espectral (luminancia y color), la irradiancia (iluminancia y color) y algunos índices asociados a la brillantez. Los resultados de la simulación se presentan como imágenes coloreadas, valores numéricos o contornos. Radiance es usado actualmente por ingenieros y arquitectos para predecir los efectos de la iluminación, la calidad visual y la apariencia de espacios en diseños innovadores. Algunos investigadores lo usan para evaluar nuevas tecnologías de iluminación diurna y nocturna. Actualmente, existen cientos de usuarios de este programa en todo el mundo, incluyendo instituciones de investigación públicas y privadas, así como grandes compañías de ingeniería y arquitectura.

El modelado geométrico es importante en el diseño por computadora (CAD) así como en la robótica y en otros campos. Otro método, llamado RAYCASTING es un desarrollo computacional de utilidad en muchas aplicaciones del modelado geométrico que se usa para calcular escenas sombreadas y propiedades de sólidos, pero que también puede usarse en la detección de colisiones. Los algoritmos de este paquete dependen de la forma de representar sólidos. Este es un aspecto importante en todos los métodos, porque determina el requerimiento de memoria para la elaboración de una imagen. Algunas técnicas de representación usan una aproximación poligonal que consiste de un conglomerado de triángulos que se ve como una esfera, pero que no lo es, en tanto que el trazado de rayos produce una esfera verdadera. En términos de cantidad de memoria, la definición directa de la esfera es mucho menos demandante que la representación poligonal, ya sea por triángulos o por otros polígonos.

OTROS PROGRAMAS

Existen muchos programas que pueden generar imágenes por medio del trazado de rayos (ART, DKBtrace, Ray4, MTV, QRT y DBW, por ejemplo). También hay programas que se basan en otras técnicas, como Autodesk's 3D Studio. Este es un paquete de modelado, generación de imágenes y animación para el ambiente Pc-IBM. Este programa emplea un método de barrido de línea para lograr efectos fotorrealistas. Debido a esto, no puede formar sombras verdaderas, reflexiones y refracciones, pero puede simularlas con una gran eficiencia para muy diversos propósitos.

Es generalmente aceptado que el trazado de rayos produce las imágenes más realistas. La técnica se aplica en CAD precisamente por la necesidad de realismo en el proceso de diseño. Su uso en éste y en otros campos se ve limitado solamente por las enormes cantidades de tiempo asociado con sus algoritmos, los que, por otro lado, también son los más realistas. Entonces, es sólo lógico que se dedique un gran esfuerzo para reducir esos tiempos mediante la vectorización del algoritmo (Plunkett y David, 1984) o la implementación de procesadores vectoriales o en paralelo.

Todos los trazadores de rayos dependen esencialmente de un modelo de partícula (un rayo): la luz se propaga en rayos rectos e infinitamente delgados. Un enfoque diferente, dado por

Moravec (1981), introduce un modelo de onda: la luz se propaga en frentes de onda que se almacenan en arreglos de números complejos bidimensionales. En este método, el viaje de un frente de onda se puede simular por una transformación lineal. Las propagaciones en una dirección ortogonal al plano del frente de onda son convoluciones que pueden calcularse con la FFT en mucho menor tiempo que el necesario para operaciones similares con rayos. La longitud de onda de la iluminación coloca automáticamente un límite en la resolución que elimina el cálculo de elementos que no serán visibles en la escena. Los frentes de onda generados contienen multiplicidades de vistas de la escena que se pueden extraer uno a uno, viendo la escena a través de diferentes lentes.

REALIDAD VIRTUAL

¿QUÉ ES LA REALIDAD VIRTUAL ?

El término "Realidad Virtual" es en la actualidad usado por mucha gente, con diferentes acepciones. La definición considerada como la más precisa es la siguiente:

"Realidad Virtual es una forma que tienen los seres humanos para visualizar, manipular e interactuar con computadoras y datos extremadamente complejos".

La parte de la visualización se refiere a la generación en la computadora de efectos sensoriales, ya sean visuales, auditivos, o de otra naturaleza. Los visuales son imágenes o representaciones gráficas de un mundo que se encuentra dentro de la máquina, que puede ser un modelo CAD, una simulación científica o la inspección de una base de datos. El usuario puede interactuar con ese mundo y manipular directamente los objetos que ahí se encuentran.

LA GEOMETRÍA SÓLIDA CONSTRUCTIVA

Los objetos del mundo tienen toda clase de formas: caprichosas y complejas, simples y directas, pero no hay ningún objeto del mundo que no se pueda reproducir en forma, dimensiones y textura. Para este efecto se diseñó la geometría sólida constructiva (GSC) (Wilt, 1994). La GSC usa las reglas de la teoría de conjuntos para crear objetos complejos a partir de objetos simples de la misma manera que un escultor usa la plastilina para modelar un objeto: la *unión*, la *intersección* y la *diferencia* entre conjuntos son las operaciones (Booleanas) básicas (Figura 1). A estas, la GSC ha añadido otras (no Booleanas), como la *fusión*, que consiste en la desaparición de las fronteras interiores de la unión de conjuntos que se intersectan. Estas operaciones se usan para formar toda clase de cosas. Como un ejemplo, supongamos que queremos formar una lupa (Figura 2). Nuestro primer paso es generar dos esferas iguales, el segundo, colocarlas como se muestra en la parte izquierda de la Figura, y luego tomar su intersección. Una vez que el objeto tridimensional ha sido creado, se le dota de propiedades materiales y ópticas, como su transparencia u opacidad a ciertos colores, su refractividad y reflectividad, y

otros parámetros. Luego, si se desea, se le da una textura particular. En el caso de la lupa de la Figura 2, haría falta especificar el índice de refracción de la intersección obtenida. La Figura 3 muestra a la Tierra en la forma de una gota de lluvia cayendo en un estanque. Esta figura fué elaborada con esferas, conos y otros objetos geométricos que se "fundieron en uno" para formar la gota, y procedimientos especiales para texturizar su superficie con los rasgos de la superficie terrestre.

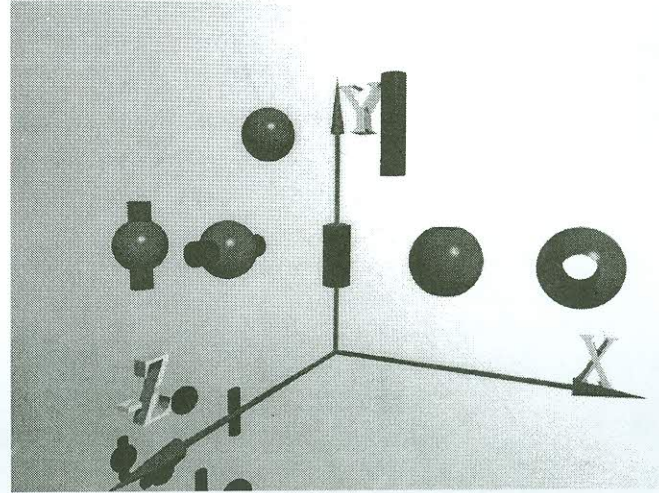


Figura 1. Las operaciones básicas de la geometría sólida constructiva: *unión*, *intersección* y *diferencia*. La unión de la esfera gris atravesada por el cilindro negro (arriba) se ilustra en la extrema izquierda. La siguiente figura a la derecha es la misma unión rotada 90 grados. En seguida tenemos la intersección (un cilindro cuya longitud es el diámetro de la esfera). La figura que sigue (diferencia) se forma sustrayendo el cilindro de la esfera. La figura final es la misma diferencia rotada 90 grados.

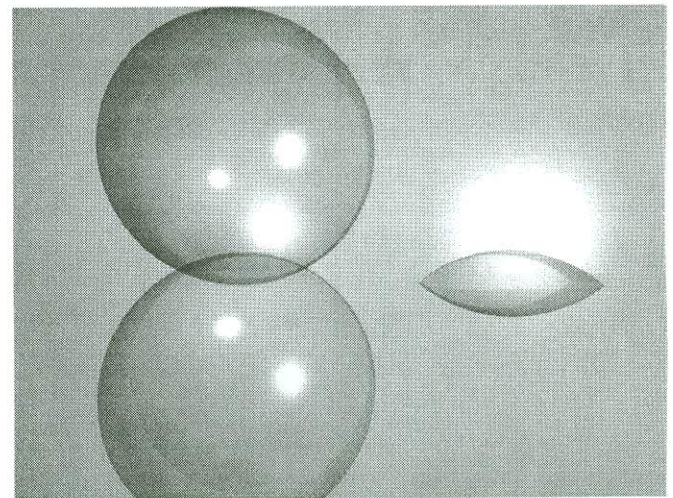


Figura 2. Un ejemplo sencillo de geometría sólida constructiva. La creación de una lente biconvexa con índice de refracción diferente de 1.

CAMPOS DE ALTURAS Y MODELOS DE COLOR

Uno de los objetos de mayor aplicación dentro del universo virtual son los campos de alturas o la creación de montañas

(Figuras 4 y 8). Aunque esta área era ya conocida por los militares (quienes la consideraron estratégica) en la década de los setenta, su uso comenzó a difundirse después de que Loren Carpenter, un ayudante de George Lucas, el director de la "Guerra de las Galaxias" ideó procesos computacionales para generar montañas prácticamente en tiempo real (Cook, Porter y Carpenter, 1984). A diferencia con programas comunes de graficación que generan superficies de nivel, en los campos de altura del universo virtual la altura se maneja usando el color como una variable (Hall, 1989).

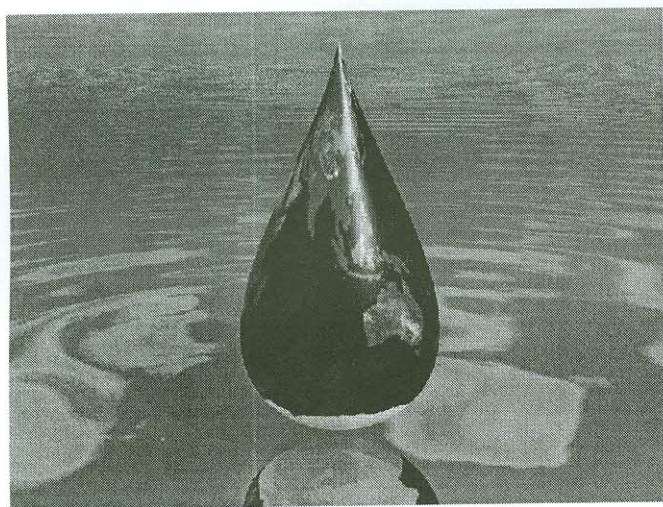


Figura 3. Un ejemplo de la construcción de un objeto complejo por medio de la GSC. La Tierra con la forma de una gota de lluvia cae en un estanque lleno de agua.

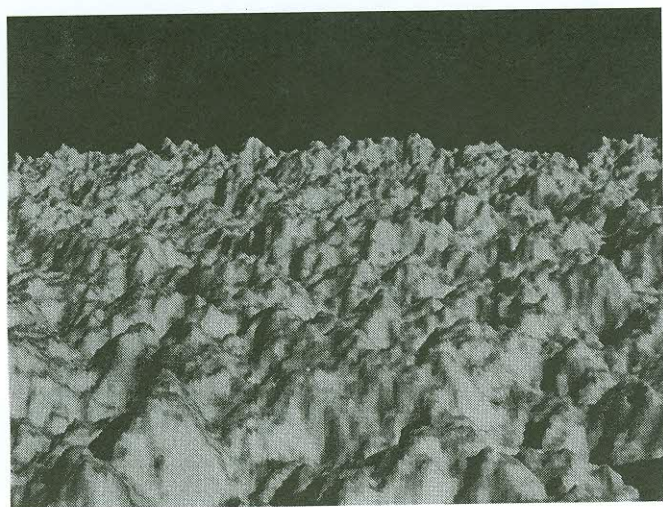


Figura 4. Un campo de alturas generado con números al azar y en escala de 256 grises.

Para que esto fuera posible, en 1931 se estableció el "Estandar Internacional de Colores Primarios", a través de la Comisión Internacional para la Iluminación (Commission Internationale de l'Eclairage, también llamada la CIE). El propósito de este estandar es permitir que todos los demás colores se puedan definir como la suma pesada de tres colores primarios. Puesto que no existen tres colores en el espectro

visible capaces de permitir esto, los colores "estandar" primarios establecidos por la CIE no corresponden a colores reales. Sin embargo, esto no es importante, porque cualquier color real se debe solamente a las cantidades de cada color primario matemáticamente necesarias para producirlo. Cada color primario en el estandar internacional se define por medio de su curva de distribución de energía (Hearn y Baker, 1986; Figura 5).

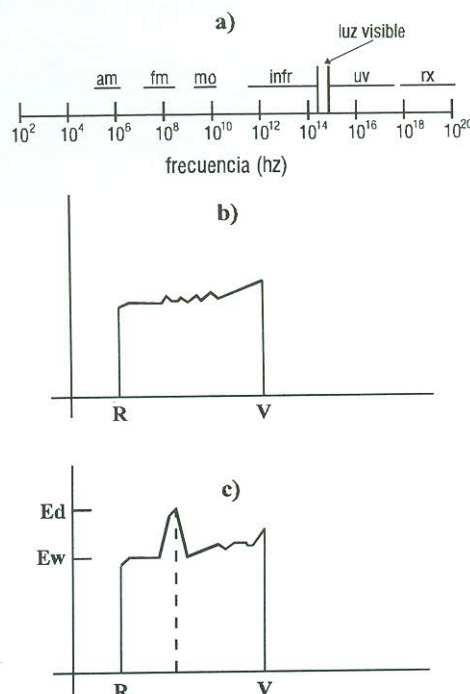


Figura 5. a) El espectro electromagnético. b) Distribución de energía en función de la frecuencia para la luz blanca y c) para una luz que contiene una frecuencia dominante.

No pretenderemos aquí hacer una revisión completa de los modelos de color existentes, ya que es un tema demasiado extenso. Un modelo del color es un método que sirve para explicar las propiedades o el comportamiento del color, y como hasta la fecha no existe un modelo único que explique todos los aspectos del color, se acostumbra usar modelos diferentes para describir las diferentes características que pueden ser percibidas. En los párrafos que siguen, intentaremos dar los fundamentos de los modelos de color y explicaremos el modelo RGB.

PROPIEDADES DE LA LUZ

Lo que los humanos percibimos como luz, o los diferentes colores, es solamente una estrecha banda de frecuencias dentro del espectro electromagnético. Otras bandas dentro de este espectro se conocen como "radioondas", "microondas", "ondas infrarrojas" y "rayos X". La Figura 5 muestra los rangos de frecuencias aproximadas para estas bandas. Cada valor de la frecuencia dentro de la banda visible corresponde a un color diferente. En el extremo de las bajas frecuencias se encuentra

el rojo con 4.3×10^{14} Hz, y en el de las altas frecuencias está el violeta con 7.5×10^{14} Hz. Entre estas dos frecuencias, el ojo humano es capaz de distinguir hasta 400,000 tonos de color diferentes que van desde el rojo, pasan por el anaranjado y el amarillo en baja frecuencia, y van hacia los verdes, azules y violetas en el extremo de la alta frecuencia. En este extremo, la longitud de onda de la luz es cercana a los 400 nm, mientras que en el otro extremo es de alrededor de 700 nm (1 nanometro = 10^{-9} m).

Una fuente de luz común, como un foco eléctrico o el sol, emite todas las frecuencias dentro del rango visible para producir luz blanca. Cuando esta luz incide en un objeto algunas frecuencias se reflejan y otras son absorbidas por el objeto. La combinación de frecuencias presentes determina lo que percibimos como el color del objeto. Si predominan las bajas frecuencias en la luz reflejada, el objeto se describe como rojo y decimos que la luz percibida tiene una *frecuencia dominante* en el extremo del rojo. La frecuencia dominante es también llamada la *coloración* o el *matiz* de la luz.

Cuando nuestros ojos ven una fuente de luz, responden al color (la frecuencia dominante) y a otras dos sensaciones básicas. Una de ellas es la "luminancia" o brillantez, que está asociada a la intensidad de la luz: mientras más fuerte o brillante sea ésta, más fuerte o brillante aparece la fuente. La otra sensación es la "pureza" o saturación de la luz: los colores pálidos o "pasteles" se describen como menos puros. El término "cromaticidad" se refiere a las dos propiedades: pureza y frecuencia dominante.

La energía emitida por una fuente de luz blanca tiene una distribución sobre las frecuencias visibles como se muestra en la Figura 5. En la luz blanca (b), cada frecuencia contribuye más o menos igual. Cuando hay una frecuencia dominante, la energía toma la forma mostrada en la parte (c) de la figura.

En la Figura 5 (b), la energía de la frecuencia dominante se señala como E_D , y las contribuciones de las otras frecuencias producen luz blanca de intensidad E_w . La brillantez de la fuente se puede calcular como el área bajo la curva, dando la energía total emitida. La pureza depende de la diferencia entre E_w y E_D . Mientras mayor sea esta diferencia, más pura es la luz. Tendremos una pureza del 100% cuando $E_w = 0$ y una pureza de 0 cuando $E_w = E_D$.

Cuando la luz es la combinación de dos o más fuentes, vemos una luz resultante con características determinadas por las fuentes originales. Dos fuentes de color con intensidades adecuadas pueden combinarse para producir una amplia variedad de colores. Si dos fuentes se combinan para producir luz blanca, sus colores se llaman "complementarios".

Típicamente, los modelos de color que describen combinaciones de luz en términos de frecuencias dominantes usan tres colores para obtener una amplia variedad de ellos. Esto se conoce como el "gamut" del color para dichos modelos. Los dos o tres colores usados como base se denominan colores "primarios".

DETERMINACIÓN DEL COLOR

Si A, B y C representan las cantidades de estándares primarios necesarios para formar un color dentro del espectro visible, las componentes de ese color se pueden escribir como

$$x = \frac{A}{A+B+C}, y = \frac{B}{A+B+C}, z = \frac{C}{A+B+C} \text{ modelo RGB}$$

puesto que $X + Y + Z = 1$, se concluye que basta con dos colores para definir un color. Esto nos permite representar todos los colores en un diagrama bidimensional. Cuando graficamos los valores X y Y para colores en el espectro visible, obtenemos la curva en forma de lengua de la Figura 6 (a) a la izquierda. Esta curva recibe el nombre de "Diagrama CIE de cromaticidad". La posición del punto C corresponde a la luz blanca, o más bien a una aproximación estándar de la luz media del día, conocido como "iluminante C". Los puntos sobre la curva representan los colores según su longitud de onda en nanómetros. El diagrama de cromaticidad provee los medios para definir cuantitativamente la pureza y la longitud de onda dominante. Para cualquier punto - color, como C_1 , definimos la pureza del color como la distancia desde C_1 al punto de luz blanca C, a lo largo de la línea recta que los une. En la Figura 6, el color C_1 tiene una pureza cercana al 50%, por estar situado casi a la mitad entre C y C_2 . La longitud de onda dominante de cualquier color se define como la longitud de onda sobre la curva espectral que intersecta la línea que une C con el punto para el color, en este caso C_1 . Es decir, C_2 (entre 500 y 520 nm en la figura).

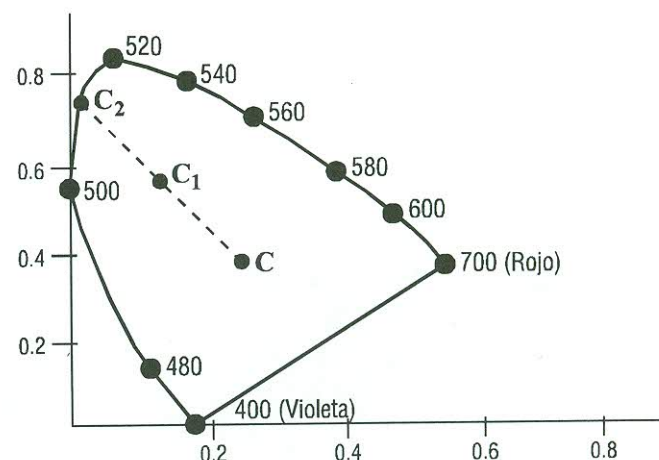


Figura 6. El diagrama CIE de cromaticidad, con las posiciones de los colores dentro del espectro visible marcadas en unidades de longitud de onda (nm).

EL MODELO RGB

Nuestros ojos perciben el color debido a la estimulación de tres pigmentos visuales situados en los conos de la retina. Estos pigmentos tienen una sensibilidad máxima a longitudes de onda cercanas a los 630 nm. (rojo), 530 nm. (verde) y 450 nm. (azul). Comparando intensidades en una fuente de luz, percibimos el

color de esa luz. Esta teoría de la visión, llamada "el tri-stímulus" es la base sobre la cual operan las salidas de color a un monitor o a una pantalla usando los tres colores primarios (rojo, verde y azul), algo que se conoce como el modelo RGB. Una representación gráfica del modelo se muestra en la Figura 7. El cubo unitario se define con tres de sus aristas como los ejes R, G, B. El origen representa el negro y el vértice (1,1,1) es el blanco. Los colores primarios se encuentran a lo largo de los ejes y los ejes restantes representan los colores complementarios (cyan, amarillo y magenta). Un color complementario es el que se obtiene restando el color inicial del blanco. Por ejemplo, el cyan se obtiene quitando el rojo del blanco y dejando solo el verde y el azul. Este esquema de colores es aditivo: las intensidades de los colores primarios se añaden para formar otros colores. Cada punto dentro del cubo se puede representar como una terna de números (r,g,b), donde los valores r,g y b son un número entre cero y uno. El vértice magenta se obtiene añadiendo el rojo al azul para producir la terna (1,0,1); el amarillo es la suma del verde y el rojo, con la terna (1,1,0). Los grises se encuentran a lo largo de la diagonal principal del cubo, desde el origen (negro) hasta el vértice blanco. Cada punto a lo largo de esta diagonal tiene igual contribución de los tres colores primarios.

Otros modelos de color en uso se forman a partir de los colores complementarios (modelo CMY), o a partir de otros parámetros, como la saturación y el matiz y el "valor" (HSV).

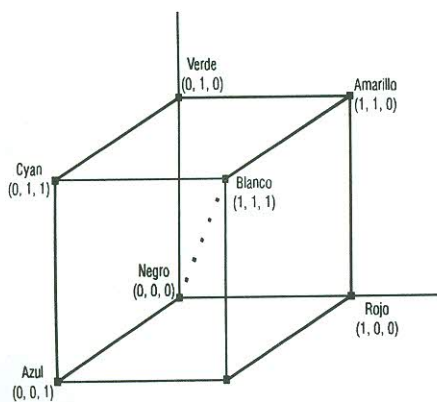


Figura 7. El modelo RGB define los colores mediante un proceso aditivo dentro del cubo unitario

En los programas usuales de graficación, se acostumbra dar un conjunto de coordenadas (x,y) y sus correspondientes alturas (z) en ascii o binario, lo cual ocupa mucha memoria. En los programas de generación de imágenes, las coordenadas (x, y) pueden ser la posición de los píxeles de una imagen, y la altura z es el color contenido en cada uno de ellos. Este color es una combinación de dos colores primarios, y su modo de combinarse da lugar a la posibilidad de diferenciar entre 65536 tonos diferentes si se usa una paleta de 256 X 256 tonos, o entre 256 si se usa una paleta de 16 X 16 tonos. No hay restricción en la división del color, es decir, uno puede crear su propia paleta con dimensiones arbitrarias. Esto se puede calibrar a cualquier escala de dimensiones que se encuentre dentro de los límites de precisión de la computadora, es decir, se puede usar para diferenciar cantidades a escalas que pueden ir desde millonésimos de centímetro hasta cientos de miles de kilómetros, con la misma precisión relativa.

En la realización de este tipo de trabajo, la rapidez y la capacidad de la computadora suelen ser esenciales. En el cpu, una pulgada de longitud a mediana resolución puede representarse usando 320 píxeles. Tomando como referencia los datos de elevación del territorio nacional del INEGI, que están dados en cuadrados de un grado de longitud por un grado de latitud (~ 111.14 X 100 Km² en promedio para el norte de México) y con una densidad de 1201 puntos por lado (1.445,000 puntos en el área), encontramos que cada grado cuadrado a la resolución total es de aproximadamente 9.5 cm por lado. En formato binario, cada grado cuadrado original requiere aproximadamente 1.45 Mb, mientras que en formato ascii requiere cerca de tres veces o más esa cantidad. Independientemente del tipo de trabajo que se pretende hacer, armar un mapa como el de la Figura 8 a la resolución original requiere el uso simultáneo de 25 grados cuadrados, lo cual implica manejar algo así como 33 millones doscientos cincuenta mil datos. Esto, aunque es posible con una buena máquina, resulta inútil si el mapa se reduce a un tamaño típico de, digamos un

metro por un metro, ya que en esta reducción la resolución se pierde efectivamente, no solamente para el ojo humano.

El mapa que se muestra en la Figura 8 está elaborado de la siguiente manera: primero, cada grado cuadrado o fracción cuadrada de grado cuadrado se convierte a un archivo de N X N píxeles, en el que la posición de cada píxel respecto de una esquina de referencia representa las coordenadas del punto correspondiente y el color que ilumina el píxel representa la altura. Este color es una combinación de dos colores primarios del modelo RGB, el verde y el rojo, en una paleta de 256 X 256, o 65536 combinaciones posibles. Enseguida, se armó un mosaico con todos los cuadrados rojiverdes. Este mosaico fue procesado mediante el trazado de rayos para producir el objeto tridimensional "campo de alturas". La distribución o campo de alturas resultante puede colorearse arbitrariamente para tratar de enfatizar algunos rasgos fisiográficos de interés, y diferentes fuentes de iluminación pueden usarse con el mismo propósito.

ANIMACIONES

Como se señaló al principio, estos métodos han sido conocidos al menos desde las últimas dos décadas. Con la muy reciente popularización de las máquinas (PC) rápidas (686, pentium, etc., a 160, 200 y más Mhz), el manejo de imágenes se ha difundido tanto, que podemos decir que entramos a la era, no de las imágenes, sino de las animaciones. Hablar de animaciones es hablar de concatenamientos de imágenes, tal y como se hace en el cine, y entonces estamos en otra etapa de requerimientos de memoria y de rapidez. Si una imagen aceptable tiene .5 Mb y queremos crear una animación de medio minuto (un clip) a la velocidad de la TV, que es de 25 imágenes por segundo, necesitaremos crear 750 imágenes, lo cual equivale a 375 Mb; si crear cada imagen toma cinco o seis minutos en una pentium, entonces hablamos de 60 horas de trabajo continuo de máquina y al menos otras tantas del operador, aparte del tiempo que lleve el desarrollo de los algoritmos y la edición. Si se quiere crear y manejar una

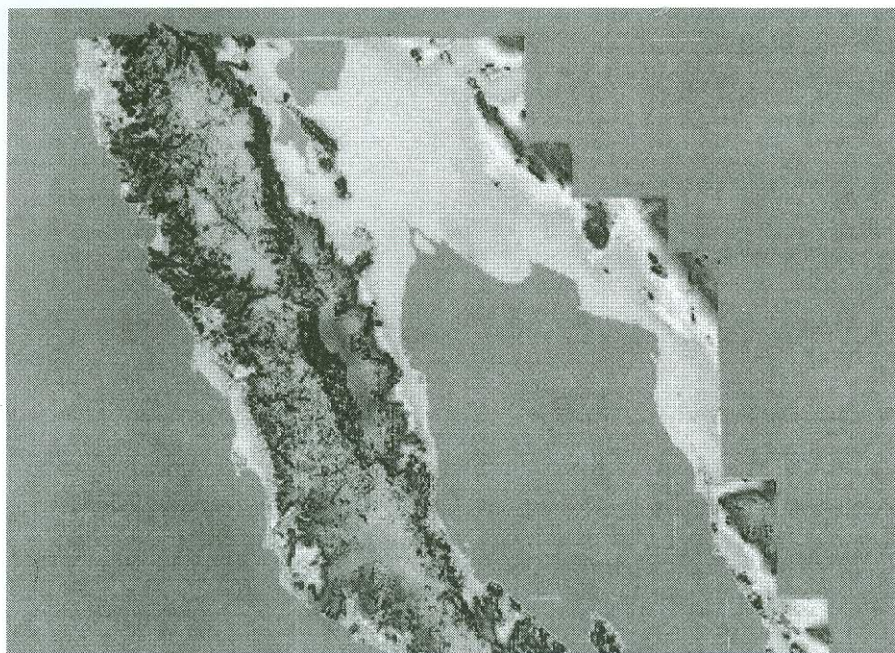


Figura 8. Una representación de la topografía de la región de Baja California, elaborada con datos de elevación del territorio nacional del INEGI.

imagen del territorio nacional completo usando los datos del INEGI, por ejemplo, se requiere de una supercomputadora.

Una de las aplicaciones más importantes de las animaciones en realidad virtual son los programas de entrenamiento por simulación de vuelo. Estos programas pueden crear un modelo detallado de cada aeropuerto importante en el mundo. En la década de los ochentas, cuando el precio del petróleo sufrió importantes aumentos, el precio de los vuelos de entrenamiento usando aviones reales era de aproximadamente \$100.00 U.S. por minuto. En ese tiempo, la FAA (Federal Aviation Administration) de los Estados Unidos requirió que la diferencia entre realidad y simulación fuese tan pequeña como fuera posible. Esto llevó a programaciones tan sofisticadas y eficientes, que las generaciones actuales de esa programación son capaces de simular los fenómenos atmosféricos más complejos, como tormentas, niebla, y aún pistas cubiertas de nieve o granizo. Todo esto a bajo costo y sin riesgos físicos reales. Otras aplicaciones de las animaciones se han dado en el campo de la astrofísica para simular las zonas de emisión de estrellas pulsares y visualizar sus geometrías, y en la física teórica en el estudio de sistemas dinámicos y en la Teoría Especial de la Relatividad.

¿Cómo se vería el universo desde un vehículo que se mueve a .99 de la velocidad de la luz? Los principios físicos y los métodos matemáticos para responder esta pregunta se conocen desde hace casi un siglo, cuando Einstein formuló la Teoría Especial de la Relatividad en 1905, pero siempre se han expresado "en abstracto". Recientemente, sin embargo, ha sido posible crear imágenes realistas de un universo observado a velocidades relativistas. Algunas de estas imágenes revelan efectos que habrían sido difíciles de predecir sin las técnicas de visualización por computadora. De acuerdo con lo expresado por un grupo de trabajo de la Universidad de Carnegie Mellon, los cambios cruciales en la programación consisten en registrar el tiempo que pasa un rayo viajando en el espacio-tiempo desde su fuente hasta el ojo del observador, lo cual implica que la velocidad de la luz es finita (los trazadores de rayos suponen, en general, una velocidad infinita), y el uso de la transformación de Lorentz entre sistemas que se mueven a velocidad relativa constante. De estos cambios, los efectos de la Relatividad Especial surgen automáticamente: la contracción de la longitud, la dilatación del tiempo y la distorsión óptica debida a las diferencias en tiempo de tránsito, así como el corrimiento Doppler: hacia el azul para

objetos que se aproximan y hacia el rojo para los que se alejan. Cambios simultáneos hacia el rojo y el azul también existen, así como un efecto de segundo orden debido a la interreflección entre objetos en movimiento relativo (Hsiung, Ping-Kang, Thibadeau, y Wu, 1990).

El gobierno de los E.U. se interesó desde un principio en las animaciones por computadora. De hecho, todos los proyectos iniciales de graficación por computadora y animación, que después llevaron al desarrollo de los primeros simuladores de vuelo, fueron financiados por la NASA y el Departamento de Defensa. Los riesgos de poner una sonda lunar sobre la superficie del satélite fueron analizados en un simulador elaborado por la General Electric.

En la elaboración de las imágenes para una animación, lo ideal es que las imágenes sucesivas se produzcan en un tiempo imperceptible al espectador. Aunque los programas trazadores de rayos no pueden cubrir este requisito, es posible diseñar una máquina paralela capaz de lograr operar en tiempo real, sacrificando la calidad de la imagen. Los procesadores en semejante máquina se organizan para formar un árbol binario. Los procesadores en las hojas del árbol barren/convierten superficies, produciendo una secuencia de segmentos, donde un segmento es la porción de una superficie que aparece en una sola línea de barrido de la escena. Los procesadores que se encuentran hacia la raíz del árbol aceptan dos secuencias de segmentos y producen una tercera secuencia en la cual todos los segmentos se ordenan siguiendo una regla prescrita. La imagen final se obtiene en la raíz del árbol. Esta forma de proceder permite eliminar los cuellos de botella en la transmisión de la información y el árbol resultante puede extenderse a escenas de complejidad arbitraria simplemente aumentando el número de procesadores.

El manejo de imágenes se encuentra actualmente en un "boom". Existen ya una cantidad de lenguajes diseñados específicamente para manejar -extraer, transmitir, trasladar, rotar etc.- imágenes fijas y animaciones, muy eficientes. El universo virtual ha incidido directamente en la ciencia y podemos esperar que amplíe

los horizontes actuales del modelado científico en prácticamente todas sus áreas.

REFERENCIAS

- Cook, Robert L., Timothy Porter y Loren Carpenter. Distributed ray tracing. SIGGRAPH 84, 137-145. In Computer Graphics 18 (34), July, 1984, ACM SIGGRAPH, New York.
- Hall, Roy, Illumination and color in computer generated imagery. New York, Springer - Verlag, 1989. 10.
- Hearn, D and M. P. Baker. COMPUTER GRAPHICS. Prentice -Hall, 1986.
- Hsiung, R, Ping-Kang, R.H., Thibadeau, and M Wu, "T-Buffer: Fast Visualization of Relativistic Effects in Spacetime", Proceedings of the 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. 83-88, 263.
- Kay, Timothy L. y James Kajiya, Ray Tracing complex scenes, Proceedings of SIGGRAPH 86, (Dallas, Texas, August, 1986, 18-22). In Computer Graphics 20 (4), August, 1986, ACM SIGGRAPH, New York.
- Leick, A., GPS Satellite Surveying, Department of Surveying Engineering, University of Maine, Orono, Maine. John Wiley and Sons, 1990.
- Madrid, J.A., La Teoría de Rayos y sus Aplicaciones, Geos, Epoca II, Vol. 17 No. 2, 1997
- Hall, Roy, y Donald P., Greenberg, A testbed for realistic image synthesis. IEEE CG&A 10), 10-20, Noviembre, 1983.
- Plunkett, David, J., A vectorized Ray-Tracing Algorithm. M. S. M. E. Thesis, Purdue University, 1984.
- Moravec, Hans, P., 3D Graphics and the Wave Theory, SIGGRAPH 81, pp. 289-296.
- Wilt, Nicholas, Object-Oriented Ray Tracing in C++. Wiley Professional Computing, John Wiley and Sons, 1994.