

FAMSI © 2005: Eugenia J. Robinson y Gene A. Ware

Imágenes Multiespectrales de las Pinturas Rupestres de la Casa de las Golondrinas



Año de Investigación: 2000

Cultura: Maya

Cronología: Preclásico, Protoclásico, y Clásico Temprano

Ubicación: Valle de Antigua, Guatemala

Sitio: La Casa de las Golondrinas

Tabla de Contenidos

[El Informe Final](#) por Eugenia J. Robinson y Gene A. Ware

[Lista de Figuras](#)

El Informe Final

La Casa de las Golondrinas, que se encuentra en el el Valle de Antigua, Guatemala, es el sitio más grande de arte rupestre de las tierras altas de Guatemala. Al igual que otros sitios de las tierras altas con arte pictórico rupestre, el sitio se encuentra en una ubicación sagrada con agua en sus proximidades. Según el pensamiento mesoamericano, las cuevas, en cuyo interior a menudo corren flujos de agua, son entradas a las montañas y simbólicamente unen los elementos tierra y agua. Junto con los picos montañosos, constituyen los santuarios naturales más importantes de

Mesoamérica. Los lugares como las cuevas, de los cuales emerge agua, también representan los atributos femeninos de creación y fertilidad. Las Golondrinas pudo haber sido un lugar de devoción para las deidades que controlaban estos aspectos de la vida.

Golondrinas bien pudo haber sido, durante miles de años, un hito religioso y político. De hecho, en el sitio se ha encontrado alfarería que data de los períodos Preclásico (1000 a.C.-300 d.C.), Clásico Temprano (300-600 d.C.), Protohistórico (1300-1500 d.C.) y Post-conquista. Muchas de las 105 pinturas que hasta el momento se han registrado en el sitio, y en base a criterios estilísticos y temáticos, parecen corresponder a las postrimerías del período Posclásico. Sin embargo, numerosos motivos abstractos y fantásticos que muestran temas y estilos inciertos, podrían dar cabida a la posibilidad de que se hayan originado en épocas más tempranas.

Diseminados a lo largo de una distancia de 500 metros, y sobre la superficie de una alta pared de piedra volcánica de 30 metros de altura, hay multitud de pinturas. Delineadas con pintura roja, pueden observarse glifos y escudos del Posclásico, imágenes del dominio político de un estado mexicano externo.

En una sección al este hay una visión solar redonda de 10 cm, labrada en una gran roca de aproximadamente 2.4 metros sobre la superficie del terreno ([Figura 1](#), abajo). Hay imágenes del sol alineadas a lo largo de la pared occidental, perpendiculares a la vista, lo que sugiere que estas imágenes reproducen las posiciones del sol (o posiblemente de otros cuerpos astronómicos) en diferentes momentos del año. En esta área del sitio se observa un énfasis en la imaginería solar, con figuras de aspecto humano con cabezas irradiantes y murales que incluyen soles prominentes.



Figura 1. Vista del hueco con la visión solar en el Área C.

En otra área hay una pintura bien preservada que muestra a un grupo de animales que parecen ir cayendo en cascada por la cara de la roca ([Figura 2](#), abajo). En esta mélange hay animales terrestres y acuáticos en poses de frente y de perfil. La compleja composición de una multiplicidad de animales acomodados los unos dentro de los otros no es común en Golondrinas. La pintura expresa una animación distinta de otras en el sitio y sugiere un tema relacionado con la fecundidad de la vida animal, o tal vez con la creación misma.

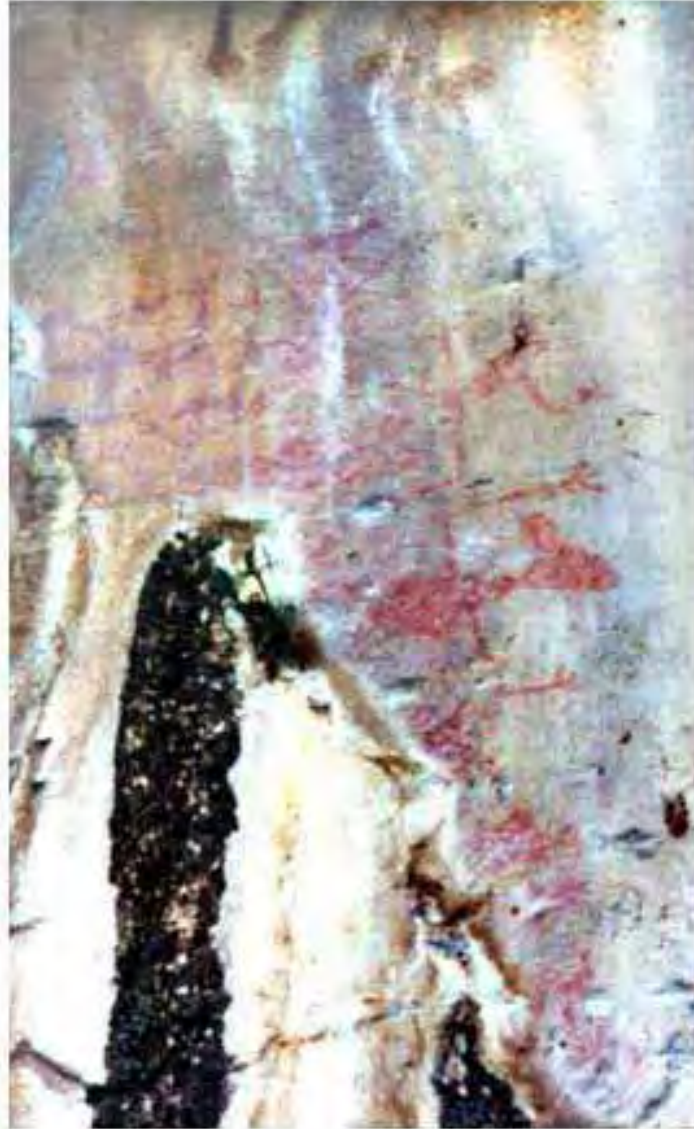


Figura 2. Fotografía de la pintura 16 en el Área A.

La toma de imágenes multiespectrales es una técnica de preservación no invasiva que permite mejorar los detalles esfumados y establecer diferencias entre los pigmentos usados en las pinturas. Las técnicas fundamentales de la representación de imágenes arqueológicas multiespectrales provienen de las representaciones de imágenes de la Tierra, a distancias remotas, tomadas desde el espacio. Para las representaciones arqueológicas, esta distancia se mide, como mucho, en unos pocos metros y no en los cientos de kilómetros que pueden separar a un sensor instalado en algún punto del espacio.

A fin de formar un cubo con una imagen multiespectral, se van apilando imágenes de la misma escena, una sobre la otra, y cada una a una diferente longitud de onda. Este cubo de imágenes multiespectrales puede procesarse para que revele información de la imagen que esté asociada con las diferencias

espectrales entre imágenes, que pueden no resultar visibles en las imágenes individuales. Por otro lado, las imágenes individuales pueden mostrar un contraste aumentado debido al ancho de banda relativamente estrecho alrededor de la longitud de onda del centro de la imagen.

En lo que a los datos de Golondrinas se refiere, cada cubo de imágenes contiene diez longitudes de onda: 450, 500, 550, 600, 750, 800, 900 y 1000 nm, cada una con un ancho de banda de 40 nm. Se usó una Kodak Megalplus 4.2i/10 para producir los archivos de imágenes digitales, que fueron grabados, en el campo, en el disco rígido de una computadora y en CD-ROM. Se grabaron 32 dibujos, y algunos dibujos se representaron en múltiples partes, lo que llevó a la obtención de cubos de 57 imágenes que contenían 570 imágenes digitales.

En varios casos, las imágenes multispectrales revelaron detalles difíciles de captar por el ojo humano. Por ejemplo, las imágenes en infrarrojo ([Figura 3b](#)) mostraban con claridad una imagen parecida a un sol con sus rayos (Área B #8), especialmente en el cuadrante izquierdo superior. En la fotografía a color ([Figura 3a](#)) también se insinúan estos rayos. Los rayos no aparecen en las imágenes tomadas a 450 y 500 nm. De las imágenes a 500, 900 y 1000 nm, se creó una composición a color falsa, en un intento por hacer resaltar los rayos.

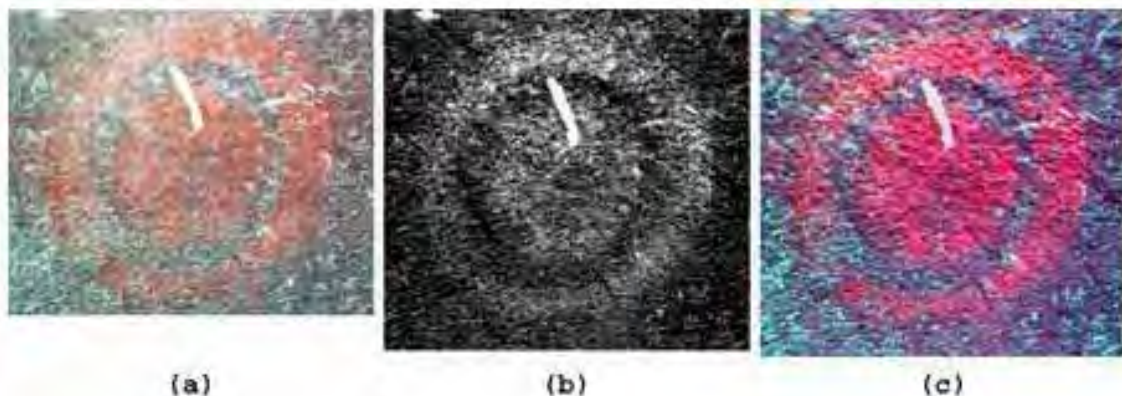


Figura 3. Imágenes del dibujo 8 en el Área B: (a) fotografía a color, (b) imagen digital a 1000 nm, y (c) imagen a color falsa compuesta con imágenes digitales a 500, 900 y 1000 nm.

Sorprendentemente, los rayos parecen desdibujarse, y cuando se los puede percibir, aparecen en un color rojo más oscuro. Las dos distintas tonalidades de rojo dan lugar a la posibilidad del uso de pigmentos distintos. Las técnicas de clasificación de espectros seguramente será de ayuda para la identificación de los pigmentos y la posible existencia de los rayos.

En la [Figura 4](#), abajo, se observan dos imágenes digitales de un sol. Nótese que a 1000 nm el pigmento ha empalidecido ([Figura 4a](#)), pero que a 550 nm ([Figura 4b](#)) aparece claramente visible. Casi todos los pigmentos, entre ellos los de Golondrinas, tienden a hacerse transparentes con el infrarrojo, como se observa

en la [Figura 4](#). Las características pigmentarias espectrales típicas de los pigmentos de la [Figura 3](#), sin embargo, se diferencian en que en infrarrojo, a 1000 nm, parecieran opacarse. Esperamos que ulteriores procesamientos de imágenes y clasificaciones de espectros, podrán ser de ayuda para la identificación de los detalles del pigmento y de las características espectrales de los dibujos de Golondrinas.

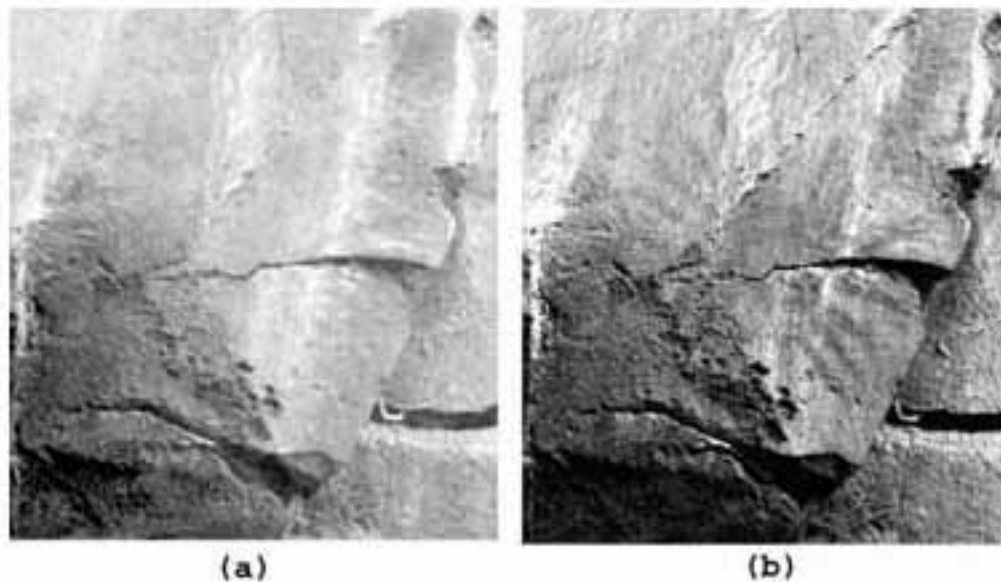


Figura 4. Pintura 10 en el Área C (a) a 1000 nm y (b) a 500 nm.

Las imágenes multispectrales de las pinturas de La Casa de las Golondrinas plantearon algunos desafíos interesantes. Como el sitio está al aire libre, las imágenes se obtuvieron usando la luz natural. Ésto a menudo dificultó el rastreo de las variaciones en la iluminación causadas por la posición del sol y las nubes. Se hizo el intento de seleccionar apropiadamente distintos momentos del día para cada dibujo. Por otro lado, los dibujos estaban ubicados a partir del nivel del suelo y hasta una altura de 6 metros por encima del mismo. Ésto a menudo dificultó o directamente impidió tomar una imagen directamente de frente. De todos modos (Área B #1), se construyó un andamio de 6 metros de altura que nos permitió tomar imágenes detalladas ([Figura 5](#), abajo).



Figura 5. Gene Ware trabajando en el andamio de 6 metros de altura en La Casa de las Golodrinas.

Lista de Figuras

[Figura 1.](#) Vista del hueco con la visión solar en el Área C.

[Figura 2.](#) Fotografía de la pintura 16 en el Área A.

[Figura 3.](#) Imágenes del dibujo 8 en el Área B: (a) fotografía a color, (b) imagen digital a 1000 nm, y (c) imagen a color falsa compuesta con imágenes digitales a 500, 900 y 1000 nm.

[Figura 4.](#) Pintura 10 en el Área C (a) a 1000 nm y (b) a 500 nm.

[Figura 5.](#) Gene Ware trabajando en el andamio de 6 metros de altura en La Casa de las Golodrinas.

FAMSI © 2005: Eugenia J. Robinson y Gene A. Ware

Imágenes Multiespectrales de las Pinturas Rupestres de la Casa de las Golondrinas



Año de Investigación: 2000

Cultura: Maya

Cronología: Preclásico, Protoclásico, y Clásico Temprano

Ubicación: Valle de Antigua, Guatemala

Sitio: La Casa de las Golondrinas

Tabla de Contenidos

[El Informe Técnico](#) *por Gene A. Ware*

[Imágenes Multiespectrales](#)

[Equipo para Imágenes Multiespectrales](#)

[Procesamiento de Imágenes](#)

[Conclusiones](#)

[Agradecimientos](#)

[Lista de Figuras](#)

[Referencias Citadas](#)

El informe técnico, *por Gene A. Ware*

Imágenes Multiespectrales

El uso de imágenes multiespectrales para la arqueología es relativamente nuevo. En la Universidad Brigham Young se diseñó y fabricó un sistema para obtener imágenes multiespectrales, adecuado para cubrir las necesidades de

esta nueva área de investigación. En este informe se describe el detalle de dicho sistema de imágenes multiespectrales y la forma en que se lo usó para tomar imágenes de petroglifos en Golondrinas, Guatemala.



Figura 1a. Típica disposición del equipo para imágenes multiespectrales en Golondrinas.

En la [Figura 1a](#) se puede observar la disposición típica de un equipo de imágenes de espectro múltiple en Golondrinas. La cámara, la rueda de filtros y las lentes se encuentran a la derecha mientras que la computadora que controla la cámara está a la izquierda. Para proteger los equipos de la luz solar directa, se usan parasoles. La luz solar directa sobre la cámara aumenta la temperatura del ordenamiento interno para la toma de imágenes, lo que provoca en la imagen el aumento del nivel de ruido. La legibilidad del display de la computadora mejora con la protección del parasol, al tiempo que reduce la temperatura de la computadora.

Este sistema se ha usado con buenos resultados para obtener imágenes de multiespectrales de una amplia variedad de artefactos, entre los que se cuentan documentos antiguos, rollos de papel o pergamino carbonizados, murales, dibujos, arte rupestre, y cerámicas. El sistema para representar imágenes fue confiablemente transportado y usado en entornos tan variados como los laboratorios, los museos, la selva y las cuevas.

Equipo para Imágenes Multiespectrales

Los elementos básicos de este sistema de representación de imágenes multiespectrales incluyen una cámara digital, una rueda de filtros, filtros ópticos, una lente y una computadora para controlar la cámara. A continuación nos referiremos brevemente a estos elementos. El Anexo A contiene una discusión más completa, presentada por Ware, Chabries y Baker (2001). Anexo A.



Figura 2a. Primer plano de la cámara Kodak Megaplex 4.2i/10 y de la rueda de filtros que se usaron en Golondrina.

El elemento fundamental del sistema de representación de imágenes es la cámara digital Kodak Megaplex 4.2i/10 que puede verse en la [Figura 2a](#), arriba¹. El ordenamiento para crear imágenes de 2029x2044 píxeles de esta cámara está recubierto para que responda desde los 200 nm hasta los 400 nm en los ultravioletas (UV), además de la respuesta normal desde los 400 nm hasta casi los infrarrojos (NIR) (near infrared) a 1100 nm. Esto permite un rango de longitud de onda de 5 a 1, que es considerablemente más amplio que el de las cámaras que se usan para fotografías a color normales. La cámara también tiene un rango dinámico de 10-bit, que corresponde a una densidad de película de más de 3.

¹ La Kodak Motion Analysis Systems Divisions ha sido adquirida por Roper Scientific MASD, Inc.

Los filtros de interferencia óptica (Schott) se usan para restringir el ancho de banda espectral de la cámara al rango de longitud de onda deseado. Hay una amplia selección disponible de estos filtros, desde los UV hasta los NIR. Los filtros para el proyecto de Golondrinas fueron seleccionados a partir de un juego de siete filtros visibles y de un juego de seis filtros NIR, ambos con un ancho de banda de 40 nm. Las transmisiones de curvas del filtro en estos filtros, fabricados por Thermo Corion Optical Filters, pueden verse en la [Figura 3a](#), abajo. Nótese que cubren la región espectral desde los 400 hasta los 1000-nm de los resquicios intersticiales de 10-nm. También se dispone de un juego de 62 filtros con un ancho de banda de 10-nm (fabricado por Andover Corporation) y un filtro ajustable visible (fabricado por Cambridge Research Instrumentation, Inc.), para la obtención de imágenes hiperespectrales detalladas.

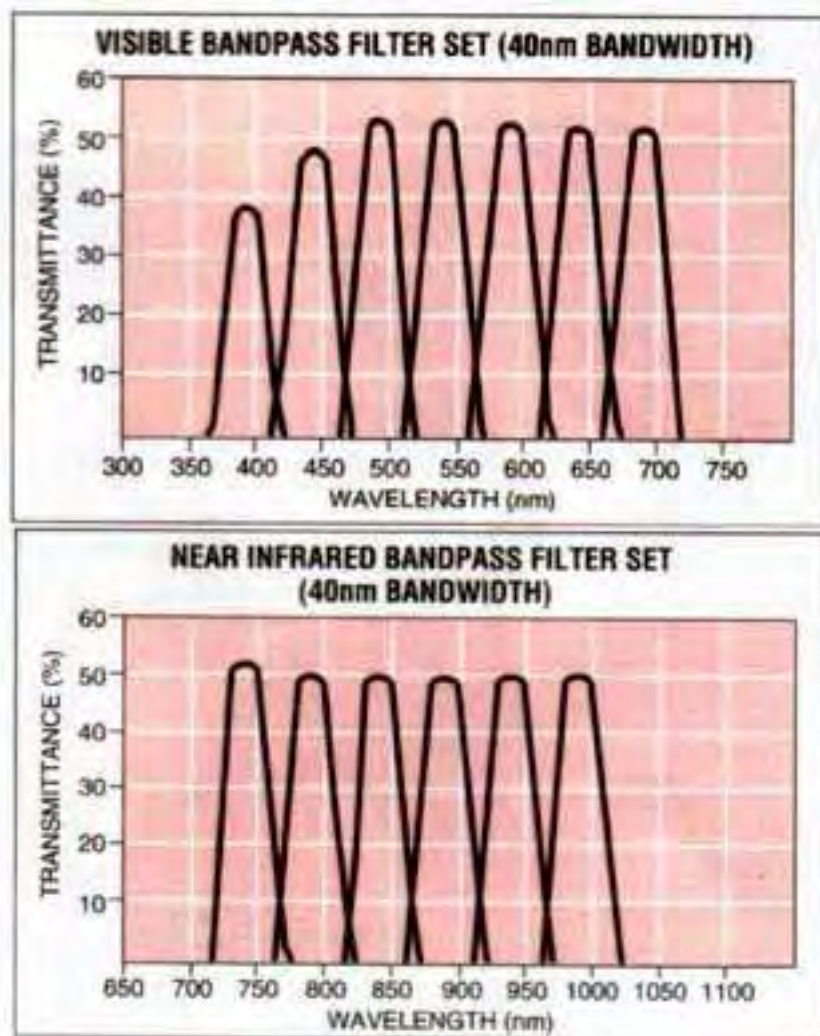


Figura 3a. Curvas de transmisión para el juego de filtros de paso de banda visible de la Corion 40-nm (arriba) y para el juego de filtros de paso de banda hasta casi el infrarrojo (abajo) (Corion Optical Filters and Coatings, 1994 Catálogo).

En Golondrinas, se llevaron a cabo pruebas en el sitio para determinar cuáles filtros específicos se habrían de usar. Las pruebas tenían que ver con la determinación de las resonancias y reflectancias espectrales de los pigmentos, al igual que con la definición de las longitudes de onda necesarias para la clasificación espectral de los pigmentos. No se observaron resonancias espectrales de banda angosta para los pigmentos, con un dibujo de prueba que permitió el uso de filtros con un ancho de banda de 40-nm. Se seleccionaron diez longitudes de onda: 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 900, y 1000 nm.

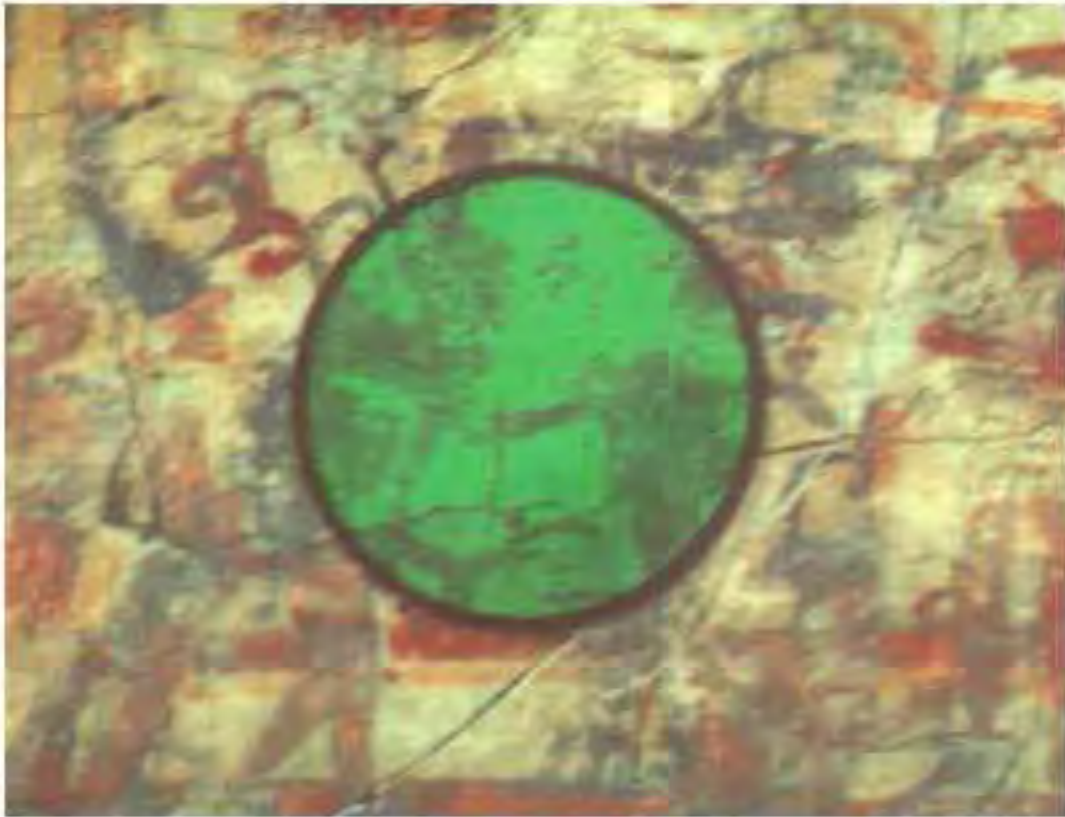


Figura 4a. Un filtro Andover 530 nm (verde).

En la [Figura 4a](#) se muestra un típico filtro de 2 pulgadas. Este filtro en particular está centrado a 530 nm (verde). Nótese que la imagen dentro del filtro varía de verde claro a verde oscuro, mientras que todos los otros colores han desaparecido. La cámara convierte esta luz verde en una imagen en escala de grises que registra la intensidad de la luz verde filtrada. Ocurre un proceso similar con cada filtro que se usa para producir el juego de imágenes multiespectrales.

La selección rápida de filtros se hace posible gracias a una rueda de filtros que, por control remoto, puede colocar el filtro seleccionado en posición. La rueda de

filtros de la [Figura 2a](#) es el delgado disco negro que se ubica frente a la cámara. Los filtros seleccionados se montaron en una rueda de filtros similar a la que se observa en la parte superior de la [Figura 5a](#), abajo. El frente de la rueda de filtros cuenta con un montaje para las típicas lentes corrientes. Para estos requerimientos de representación de imágenes en particular, se consideró apropiado usar lentes Nikon de 105 mm y de 55 mm.



Figura 5a. Rueda de filtros y lentes (arriba), e interior de la rueda de filtros (abajo).

El interior de la rueda de filtros que muestra las posiciones de montaje de los mismos se ilustra en la parte inferior de la [Figura 5a](#). La rueda de filtros que se usó en Golondrinas contenía 12 posiciones de filtros en vez de las 14 posiciones

que aparecen en la [Figura 5a](#), pero por todo lo demás era idéntica. Una correa (que no está a la vista) conecta la rueda con un pequeño motor externo DC, que se usa para rotar el filtro elegido y colocarlo en posición.



Figura 6a. Hardware para el montaje de la rueda de filtros.

Los filtros se montan en la rueda de filtros por medio de accesorios adaptadores específicos del filtro que se ha de instalar. Pueden instalarse filtros de 1 pulgada y de 2 pulgadas. Estos accesorios adaptadores aparecen ilustrados en la [Figura 6a](#), arriba. A la izquierda se encuentra un adaptador de 1 pulgada con filtros típicos de 1 pulgada. A la derecha se observa un adaptador de 2 pulgadas con un filtro típico de 2 pulgadas.



Figura 7a. Computadora para el control del sistema y el almacenamiento de datos.

La cámara se controla con la computadora que aparece en la [Figura 7a](#), arriba. En la computadora se instala una tarjeta de interfaz PCI-bus y se la conecta a la cámara con un cable digital SCSI-3. La computadora controla todas las funciones de la cámara por medio de un software especializado, y transfiere los datos de la imagen digital al disco rígido de la computadora para su almacenamiento. El software de la computadora también posibilita el almacenamiento automático de metadatos que permiten identificar los ajustes de la cámara y los filtros en uso. Esta computadora también contiene un hard drive y un escritor de CD removibles (en su lado derecho), para almacenamiento de datos y apoyo en el campo.

La forma de lonchera de la computadora fue necesaria porque no dispusimos de otras interfaces computadora-cámara fuera de la interfaz PCI-bus. Las computadoras laptop por lo general no tienen una ranura para PCI (a menos que se utilice otra estación de puerto), y por lo tanto no pueden usarse para operar la cámara. Actualmente se está desarrollando una interfaz laptop-cámara, que habrá de posibilitar el uso de las laptops en el futuro.

Procesamiento de Imágenes

El procesamiento de las imágenes de Golondrinas no se llevó a cabo en el campo. Las imágenes multiespectrales fueron revisadas diariamente, su integridad controlada, y se hizo un CD como backup. Las técnicas que pone a disposición el Adobe Photoshop se usaron para juzgar la calidad de las imágenes. También se espera que para el corpus de Golondrinas se apliquen técnicas de clasificación espectral, que habrán de aportar la diferenciación de los pigmentos y un mejoramiento de las imágenes. El fundamento teórico para este algoritmo, presentado por Martin y Ware (2001), se encuentra en el Anexo B.

Las técnicas actuales de procesamiento de imágenes que pueden ser aplicadas para el corpus de Golondrinas, incluyen análisis de componentes principales, transformaciones, diferenciamiento de imágenes y clasificación espectral (Ware et al., 1999, 2000, 2001). La clasificación espectral ha sido usada efectivamente para separar pigmentos con el conjunto de datos de Naj Tunich, y se espera que produzca resultados significativos en Golondrinas.

Como se ha indicado más arriba, (Equipo para Imágenes Multiespectrales) se obtuvieron imágenes de prueba para determinar las longitudes de onda de los filtros a utilizar. Actualmente este proceso es subjetivo, pero se están desarrollando softwares especiales, adecuados para las operaciones de campo, que cuantificarán esta decisión. Al mismo tiempo, se está trabajando en la actualización del software para el control de la cámara, a fin de llegar a una operación más automática y a una capacidad mayor en lo referente a metadatos.

Conclusiones

El sistema de obtención de imágenes multiespectrales de la Universidad Brigham Young ha logrado efectivamente representar en imágenes los dibujos de arte rupestre de Golondrinas. El proyecto ha permitido llegar a una comprensión importante acerca de las técnicas que son necesarias para lograr una representación de arte rupestre en imágenes, en condiciones al aire libre, que incluyen temas como el acceso, la calibración, y la iluminación (Robinson y Ware, 2001). Como resultado, se lograron tanto las modificaciones de los equipos para el sistema, como las mejoras del software. Se espera que los análisis de laboratorio de los datos darán lugar a otras mejoras del sistema, al igual que a un mayor entendimiento del arte rupestre de Golondrinas.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación fue financiado con un subsidio de la Fundación para el Avance de los Estudios Mesoamericanos, Inc., (FAMSI). La investigación multiespectral de Naj Tunich fue financiada con subsidios de FAMSI y del Centro de Estudios Avanzados en las Artes Visuales, de la Galería Nacional de Arte.

El diseño mecánico de la rueda de filtros estuvo a cargo de Dean Shaeffer, del Space Dynamics Laboratory, de Logan, Utah, y de Robert Perry, del Research Machine Shop de la Universidad de Brigham Young. Robert también jugó un papel importante en la fabricación de la rueda para filtros, y en el diseño y fabricación del hardware asociado con el sistema. El software a medida para el control de la cámara fue escrito por Craig Lindstrom, de eSage, Pleasant Grove, Utah.

Todas las imágenes se han usado previa autorización de la Universidad Brigham Young, de Provo, Utah.

Lista de Figuras

[Figura 1a](#). Típica disposición del equipo para imágenes multiespectrales en Golondrinas.

[Figura 2a](#). Primer plano de la cámara Kodak Megaplug 4.2i/10 y de la rueda de filtros que se usaron en Golondrinas.

[Figura 3a](#). Curvas de transmisión para el juego de filtros de paso de banda visible de la Corion 40-nm (arriba) y para el juego de filtros de paso de banda hasta casi el infrarrojo (abajo) (Corion Optical Filters and Coatings, 1994 Catálogo).

[Figura 4a](#). Un filtro Andover 530 nm (verde).

[Figura 5a](#). Rueda de filtros y lentes (arriba), e interior de la rueda de filtros (abajo).

[Figura 6a](#). Hardware para el montaje de la rueda de filtros.

[Figura 7a](#). Computadora para el control del sistema y el almacenamiento de datos.

Todas las imágenes han sido usadas previa autorización de la Universidad Brigham Young, de Provo, Utah.

Referencias Citadas

- Robinson, Eugenia J. y Gene A. Ware
2001 "Imágenes Multiespectrales de las Pinturas Rupestres de la Casa de las Golondrinas." Informe final presentado a FAMSI. Informe final presentado a FAMSI.
- Ware, Gene A., Douglas M. Chabries, y Doran J. Baker
2001 "Multispectral Imaging for Archaeology." SCI 2001: 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, XIII:263-267.
- Corion Corporation
1994 Corion Optical Filters and Coatings, Catálogo, Corion Corporation, Franklin, Massachusetts. págs. 110-111.
- Martin, Curtis E. y Gene A. Ware
2001 "Unsupervised Clustering for Data Reduction and Analysis of Multispectral Archaeological Images." SCI 2001: 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, XIII:257-262.
- Ware, Gene A. y James E. Brady
1999 "Multispectral Analysis of Ancient Maya Pigments: Implications for the Naj Tunich Corpus," en Center 19: Record of Activities and Research Reports June 1998-May 1999. Washington D.C.: National Gallery of Art, Center for Advanced Study in the Visual Arts.
- Ware, Gene A., Douglas M. Chabries, Richard W. Christiansen, y Curtis E. Martin
2000 "Multispectral Document Enhancement: Ancient Carbonized Scrolls." Proceedings IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, VI:2486-2488.
- Ware, Gene A., Douglas M. Chabries, Richard W. Christiansen, James E. Brady, y Curtis E. Martin
2000 "Multispectral Analysis of Ancient Maya Pigments: Implications for the Naj Tunich Corpus." Proceedings IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, VI:2489-2491.

Ware, Gene A., James E. Brady, y Curtis E. Martin
2001 "Multispectral Imaging and Spectral Classification of Naj Tunich
Pigments." PICS 2001: Proceedings of the 54th Annual Conference of the
Society for Imaging Science and Technology, 22-25 de abril, 2001, págs.
211-214.

Ware, Gene A., James E. Brady y Curtis E. Martin
2001 "Multispectral Imaging and Spectral Classification of Naj Tunich
Pigments," PICS 2001: Proceedings of the 54th Annual Conference of the
Society for Imaging Science and Technology, Quebec, Canada, 22-25
de abril, 2001.

Kirkland, John S., Doran J. Baker, y Gene A. Ware
2001 "Principal Component Data Fusion of Infrared Telescope Multi-Spectral
Images of the Galactic Center." SCI 2001: 5th World Multiconference on
Systemics, Cybernetics and Informatics, XIII:251-256.

Wilson, Terry A.
2001 "Adaptive Multivariate Clustering Technique for Archaeological Pigment
Classification." SCI 2001: 5th World Multiconference on Systemics,
Cybernetics and Informatics, XIII:268-272.

FAMSI © 2005: Eugenia J. Robinson y Gene A. Ware

Imágenes Multiespectrales de las Pinturas Rupestres de la Casa de las Golondrinas

Anexo A. Imágenes multiespectrales para la arqueología, por Gene A. Ware, Douglas M. Chabries, de la Brigham Young University, y Doran J. Baker, del Space Dynamics Laboratory, Logan, Utah.

Tabla de Contenidos

[Resumen](#)

[Imágenes Multiespectrales](#)

[Requerimientos del Sistema de Imágenes](#)

[Cámara Digital](#)

[Filtros Ópticos](#)

[Iluminación](#)

[Calibración](#)

[Ejemplo de Imágenes](#)

[Conclusiones](#)

[Agradecimientos](#)

[Lista de Figuras](#)

[Referencias Citadas](#)

Resumen

Las imágenes multiespectrales se han usado ampliamente en la detección remota de la Tierra. Su reciente aplicación a documentos antiguos, murales y artefactos arqueológicos, sin embargo, ha llevado a interesantes descubrimientos. En un escenario arqueológico, la lejanía se mide en cientos de centímetros y no en cientos de kilómetros, y tiene más que ver con junglas húmedas y calurosas que con el medio ambiente del espacio. Sin embargo, con la excepción de las diferencias que imponen los entornos externos, las técnicas de medición son similares, como también lo son los métodos para la fusión de datos empleados en el análisis de las imágenes resultantes.

Las técnicas para la representación de imágenes multiespectrales son importantes para la arqueología porque las diferencias entre las imágenes a distintas longitudes de onda revelan detalles y características que no son claramente visibles con métodos convencionales de representación de imágenes. Esto no sólo puede llevar a estimulantes descubrimientos arqueológicos, sino que también constituye una técnica de conservación tecnológicamente moderna para la preservación de antiguas formas de arte para los estudios futuros de los especialistas.

En la Universidad Brigham Young, la representación de imágenes multispectrales comenzó con los prototipos de los equipos de representación de imágenes multispectrales que se usaron en Bonampak, Chiapas, México, como parte de una expedición de la Universidad de Yale que tuvo lugar en 1995-1996, y que fue financiada en parte por el Getty Grant Program y la National Geographic Society (Miller, 1997). Mientras que las primeras imágenes que resultaron de Bonampak incluyeron videos infrarrojos (1-2 μm), películas infrarrojas, y películas a color, se hizo evidente la necesidad de un sistema moderno para representar imágenes multispectrales en la arqueología. Este sistema de representación de imágenes multispectrales para la arqueología es el que aquí se describe.

Imágenes Multispectrales

Las imágenes múltiples de una misma escena, cada una a una longitud de onda diferente, pueden estructurarse como un cubo de imágenes donde éstas se van apilando las unas sobre las otras. Al mirar hacia abajo a través del cubo de imágenes hay una secuencia de píxeles, cada uno en la misma ubicación física, pero en distintas longitudes de onda. Cuando ha sido debidamente calibrada, dicha secuencia de píxeles define un vector de reflectancia espectral, \bar{x}_{ij} , donde los índices especifican la ubicación espacial.

El término "multispectral" se usa habitualmente para describir un cubo de imágenes que contiene cada uno decenas de diferentes longitudes de onda, con un ancho de banda del orden de los 100-4000 nm (Belokon et al., 1977). Por otro lado, el término "hiperespectral" es típicamente usado para describir cubos de imágenes con cientos de longitudes de ondas y anchos de bandas en el orden de los 10 nm. El equipo de representación de imágenes aquí descrito está a medio camino entre estas dos definiciones, pero será descrito como multispectral.

Los arqueólogos a menudo descubren artefactos que contienen mucha más información de la que el ojo humano puede detectar. Esto es así sobre todo en lo referente a inscripciones o pinturas en vasijas cerámicas, muros de templos, y cuevas. Por ejemplo, los textos pintados en las cuevas mayas se encuentran entre los menos habituales de estos contextos, y hasta el momento sólo se conocen cinco de ellos. Como estas cuevas eran consideradas elementos sagrados en el paisaje maya de la antigüedad, las inscripciones podrían estar relacionadas con creencias esotéricas y doctrinas fundamentales de la religión maya, de las que puede no haber registros en ningún otro lado. El desciframiento de estos textos por medio de las imágenes multispectrales y su análisis, aportará puntos de vista importantes sobre la cultura maya.

Requerimientos del Sistema de Imágenes

Los sitios arqueológicos de importancia a menudo se encuentran en lugares apartados, son de difícil acceso, y presentan dificultades, desde el punto de vista del medio ambiente, para la operación de equipos ópticos y electrónicos sensibles. Como ejemplo de ello, la topografía de la cueva de Naj Tunich, que se encuentra en la selva de Guatemala, es expansiva tanto en la sección transversal de sus pasadizos como en la extensión hasta la cual los pasadizos penetran en la piedra caliza. Las operaciones a una profundidad que a veces es de un kilómetro hacia el interior de la cueva, hacían necesario que la cámara, la iluminación y el hardware de computación asociado, se operaran con una batería marina que había que recargar con un generador desde el exterior de la cueva. La atmósfera de la cueva es fría pero muy húmeda y ácida, y el equipo sufría un estrés adicional. Otras localizaciones pueden ser calurosas, secas, y estar expuestas a la luz solar directa, como es el caso del arte rupestre de Golondrinas, México. Además, se deseaba obtener imágenes de antiguos documentos en un ambiente de laboratorio, desde el ultravioleta hasta casi el infrarrojo. Para poder cumplimentar estos requerimientos, el sistema multiespectral debería contar con las siguientes características:

1. El sistema debe ser relativamente liviano, pequeño y resistente, para ser transportado con facilidad por aire, por vehículos de doble tracción, y por acarreo.
2. El sistema debe operar a partir de toda una variedad de fuentes de energía eléctrica inestables, como pueden ser los generadores portátiles y las baterías.
3. Los componentes críticos del sistema deben ser de fácil reparación o reemplazo en el campo.
4. El sistema debe tener la capacidad de registrar en el campo los datos de imágenes en un CD (o en otro medio no volátil).
5. La cámara debe ser una representadora de imágenes de alta resolución que responda desde los 200 nm en el ultravioleta hasta los 1000 nm en el casi infrarrojo.

Los componentes básicos del sistema de este sistema multiespectral incluyen una cámara digital, un juego de filtros capaz de seleccionar la longitud de onda apropiada de la imagen, una fuente de iluminación, y una computadora que lo controle. Al operar bajo el control de una computadora, la cámara y los filtros forman un sistema multiespectral de representación de imágenes capaz de producir secuencias de imágenes multiespectrales desde el ultravioleta hasta casi el infrarrojo. Estos componentes serán discutidos más adelante, en forma individual.

Este sistema ha sido utilizado con éxito por la Universidad Brigham Young en distintos lugares, entre ellos Dumbarton Oaks (Washington, D.C.), el Museo Nacional de Guatemala y el Museo Popol Vuh (Ciudad de Guatemala, Guatemala), Cueva de las Pinturas y Naj Tunich (cuevas mayas de El Petén,

Guatemala), Tepantitla (Teotihuacán, México), Monte Albán (Oaxaca, México), y el Centro Estadounidense de Investigaciones Orientales (*American Center of Oriental Research*) (Amán, Jordania).

Cámara Digital

Después de una revisión de las cámaras digitales de alta resolución disponibles, se seleccionó una cámara digital Kodak de rango científico¹. Esta cámara Megaplug 4.2i/10 permite una resolución espacial de 2029x2044 píxeles sensibles a la luz con un rango dinámico de 10-bit (60 dB). Los componentes del sensor de silicón intrínseco responden a longitudes de onda de los 400 nm a los 1000 nm, según se observa en la curva típica de respuesta de la [Figura 1](#), abajo. Los componentes del sensor fueron recubiertos con un compuesto de lumigen orgánico para ampliar la corta respuesta de longitud de onda a 200 nm, con una eficiencia de quantum de alrededor del 10 por ciento. El sensor de grado científico 2 resultante, contenía sólo tres píxeles defectuosos, dos de los cuales se encontraban uno junto al otro.

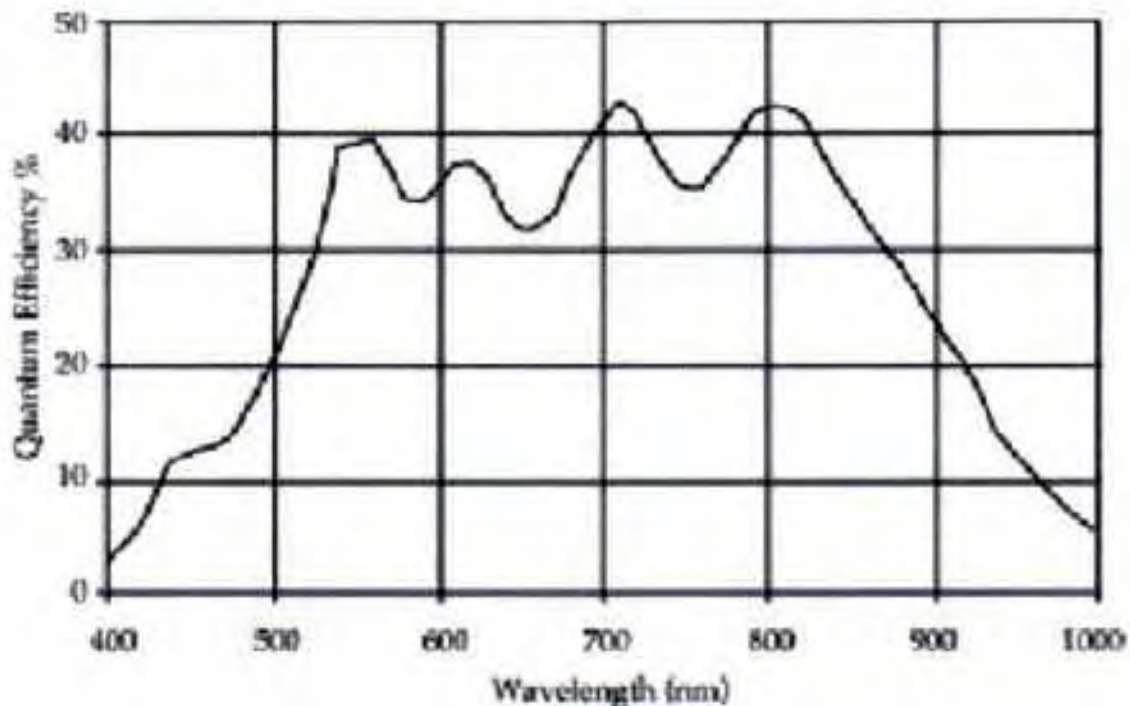


Figura 1. Respuesta típica de los sensores de la Kodak 4.2i. Curva de Roper Scientific MASD, Inc.

¹ La Kodak Motion Analysis Systems Division ha sido adquirida por Roper Scientific MASD, Inc.

El tamaño del dispositivo sensor es de 18.5x18.5 mm, con una unidad de relación de relleno de 9x9 μm , con un espaciamiento de centro a centro de 9 μm .

La cámara incluye un obturador mecánico con reguladores de exposición de 10 a 100.000 ms, lo cual permite la captura de imágenes a alta velocidad, sin viñetas. El obturador y el sensor se encuentran cerca del frente de la cámara, lo cual proporciona espacio suficiente para insertar filtros ópticos entre la cámara y la lente. La velocidad de transferencia del pixel es de 10 MHz, lo que da un marco de velocidad de 2.1 fps sin incluir el tiempo de exposición y el tiempo de computadora para la transferencia de la imagen.

Para la conexión cámara-computadora se eligió una interfaz PCI DV de una video cámara digital, fabricada por Engineering Design Team, Inc. (EDT). Esta tarjeta bus para la PCI fue la que se eligió porque usaba la memoria de la computadora para almacenar la imagen, lo que requiere aproximadamente 8 MBytes por cada pixel de 10-bits almacenados en un formato de 16-bit. Una biblioteca de software proporciona el control de la computadora sobre el tiempo de exposición de la cámara, la amplificación (0–24 dB), y el nivel de negro. Se preparó un programa a medida para proporcionar tanto el control de la cámara como el control auxiliar para los equipamientos del tipo de las ruedas de filtros, los filtros electrónicos, y las cuadros de posicionamiento XY.

Los datos de imágenes se grabaron en el disco rígido de la computadora de control. Estos datos eran transferidos, en forma regular y en el sitio mismo, a discos compactos (CDs) por medio del escritor de CDs de la computadora de control.

Filtros Ópticos

La selección de la longitud de onda de una imagen está dada por filtros de interferencia óptica altamente selectivos. Hay disponibilidad tanto de filtros ópticos fijos como ajustables. Los filtros fijos de interferencia óptica seleccionados (Schott) incluyen juegos que se corresponden de Andover Corporation, que cubren longitudes de onda de 400 nm a 1050 nm en 10 pasos de nm (62 filtros) con un ancho de banda de 10 nm, con 14 filtros de Thermo Corion Optical Filters centrados de 400 nm a 1050 nm en incrementos de 50 nm con un ancho de banda de 40 nm. Los dos juegos de filtros están bloqueados para los ultravioletas y los infrarrojos fuera del filtro de banda. Físicamente, los filtros son de 50.8 mm de diámetro, para minimizar las viñetas. También hay disponible un juego correspondiente de 10 filtros fijos ultravioletas (de 25.4 mm de diámetro).

Estos filtros fijos de interferencia pueden montarse en una rueda de filtros que permite una selección automática de los mismos, controlada por la computadora. Se prefabricaron dos ruedas de filtros, una con 12 posiciones y una con 16 posiciones. Estas ruedas de filtros se rotan por medio de un pequeño motor DC y tienen registros de sensores de posición interna para colocar e identificar

automáticamente el filtro. También hay anillos de adaptación manuales para montar un filtro frente a la lente. Se realiza una evaluación en el sitio mismo, a fin de garantizar una óptima configuración filtro-rueda para cada proyecto de representación de imágenes en particular.

También se usan filtros ajustables de cristal líquido fabricados por Cambridge Research Instrumentation, Inc. (CRI). El filtro visible de cristal líquido puede ajustarse por computadora a cualquier longitud de onda en el rango de los 400-nm a los 720-nm con un ancho de banda óptica de 20 nm. En la [Figura 2](#), abajo, se muestra una típica curva de respuesta. El filtro de cristal líquido visible está bloqueado para las longitudes de onda ultravioletas, pero requiere de un bloqueo externo para los IR.

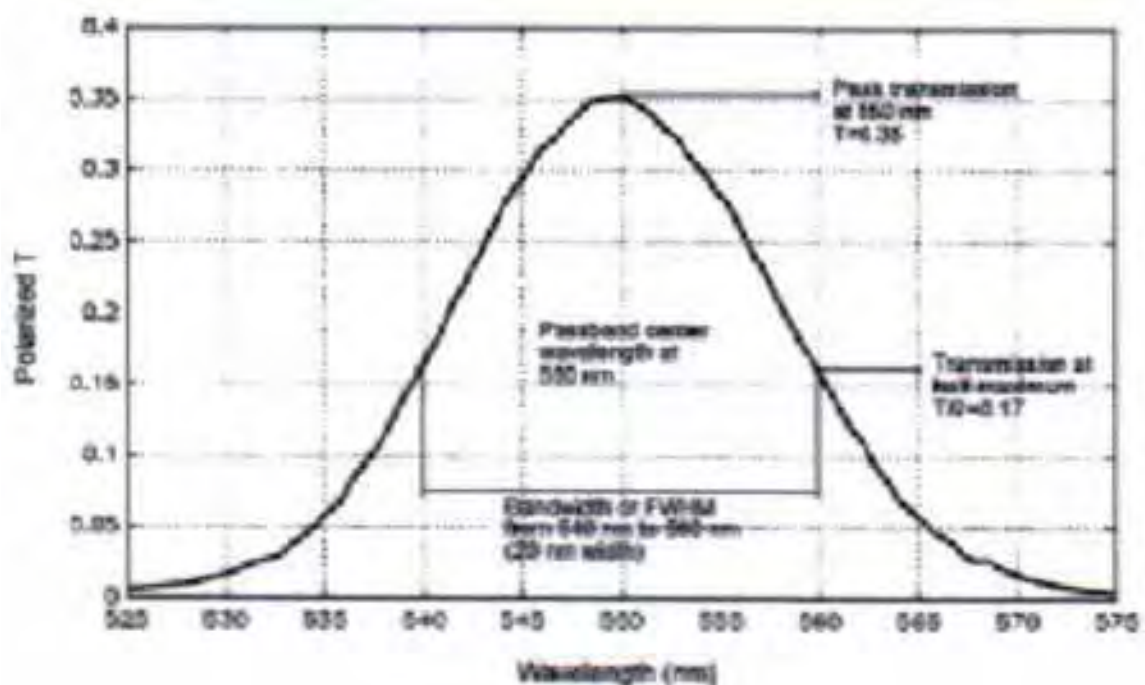


Figura 2. Respuesta típica del filtro visible ajustable CRI. Curva de Cambridge Research Instrumentation, Inc.

El filtro de cristal líquido casi infrarrojo (NIR) puede ajustarse a cualquier longitud de onda desde los 650 nm hasta los 1100 nm con un ancho de banda óptica de 7 nm, y está bloqueado para las longitudes de onda visibles y ultravioletas. Como es característico, ambos filtros están ajustados en pasos de 20 nm. El CRI también hace un filtro de cristal líquido RGB que se usa para producir imágenes a color comunes.



Figura 3. Típico sistema de representación de imágenes multispectrales instalado en Naj Tunich.

En la [Figura 3](#) se observa la configuración típica del sistema. Esta configuración fue usada para las imágenes multispectrales de los dibujos de la cueva maya de Naj Tunich, Petén, Guatemala (Ware et al., 1999, 2000, 2001). Nótese la rueda de filtros montada entre la cámara y la lente. El grosor de la rueda de filtros se debe a la intención de preservar la normal longitud focal de la lente.

Iluminación

La iluminación incidental puede ser provista tanto por luces de video de cuarzo-halógeno incandescentes como por unidades estroboscópicas. Las luces para videos usan foquitos OSRAM de cuarzo-halógeno con una temperatura de color de 3400 K que no es tan brillante en longitudes de onda cortas como las unidades de flashes de 5500 K. Los dos sistemas de iluminación proporcionan aproximadamente la misma iluminación de imagen en los infrarrojos, pero las unidades estroboscópicas ponen una carga considerablemente menor de calor en la imagen representada. Sin embargo, las luces para videos permiten el uso eficaz tanto del tiempo programado de exposición de la cámara, como de la amplificación programada para controlar la brillantez efectiva de la imagen.

También proporcionan una iluminación constante para el ajuste en tiempo real del foco.

El consumo de energía relativamente alto de las luces de video hacen que sea difícil utilizarlas por períodos prolongados de tiempo con la energía de una batería, como fue necesario hacer para representar las imágenes de los dibujos de Naj Tunich. Aquí, se usaron anillos y unidades estroboscópicas auxiliares a fin de iluminar para poder enfocar, para establecer los parámetros de la cámara y para la obtención de las imágenes finales. En el frente de la lente en la Figura 3, se ha montado una unidad de flashes en anillo.

La temperatura del color no es tan importante para las imágenes multiespectrales como lo es para las fotografías normales, por el rango relativamente angosto de longitud de onda que cubre una imagen determinada. Este rango angosto de longitud de onda, limita la energía de luz total que llega a los sensores y puede volverse crítico en longitudes de onda cortas de alrededor de 400 nm y en las longitudes de onda largas que se aproximen a los 1000 nm, donde el nivel de respuesta de los sensores es bajo.

Calibración

La calibración de un grado de respuesta absoluto de más de cuatro millones de píxeles en el sensor de las longitudes de ondas ultravioletas a las casi infrarrojas es una tarea formidable. Mientras que la uniformidad de la respuesta de los píxeles puede verificarse con mayor facilidad, casi todos los requerimientos para plasmar imágenes pueden cumplirse con una calibración relativa, usando un promedio de píxeles múltiples. Con este fin, y toda vez que sea posible, se incluye en cada imagen una tarjeta Kodak con una escala de grises, para registrar las variaciones de la iluminación incidental y para permitir la calibración relativa de los vectores de reflectancia entre las escenas. Esta es una cuestión particularmente sensible para las técnicas de clasificación espectral. La escala de grises también aporta información dimensional, cuando resulta difícil incluir una norma dimensional.

El largo focal de una lente es una función de la longitud de onda. Mientras que las lentes están recubiertas para minimizar esta variación en las longitudes de onda visibles, el ancho de banda angosto de la imagen hace que este efecto todavía se note, especialmente en los ultravioletas y el casi infrarrojo. La variación en la longitud focal con la longitud de onda de la imagen, hace necesario que cada imagen sea enfocada en forma individual, y, a su vez, hace que la magnificación de la imagen varíe como función de la longitud de onda de la imagen. Entonces, es difícil alinear con precisión el cubo de imágenes para su futuro procesamiento. El agrandamiento de la imagen (y la linealidad de ésta) pueden determinarse para cada combinación lente-filtro a través de la observación de un objetivo con una serie dimensionalmente precisa de puntos que llenen el campo visual.

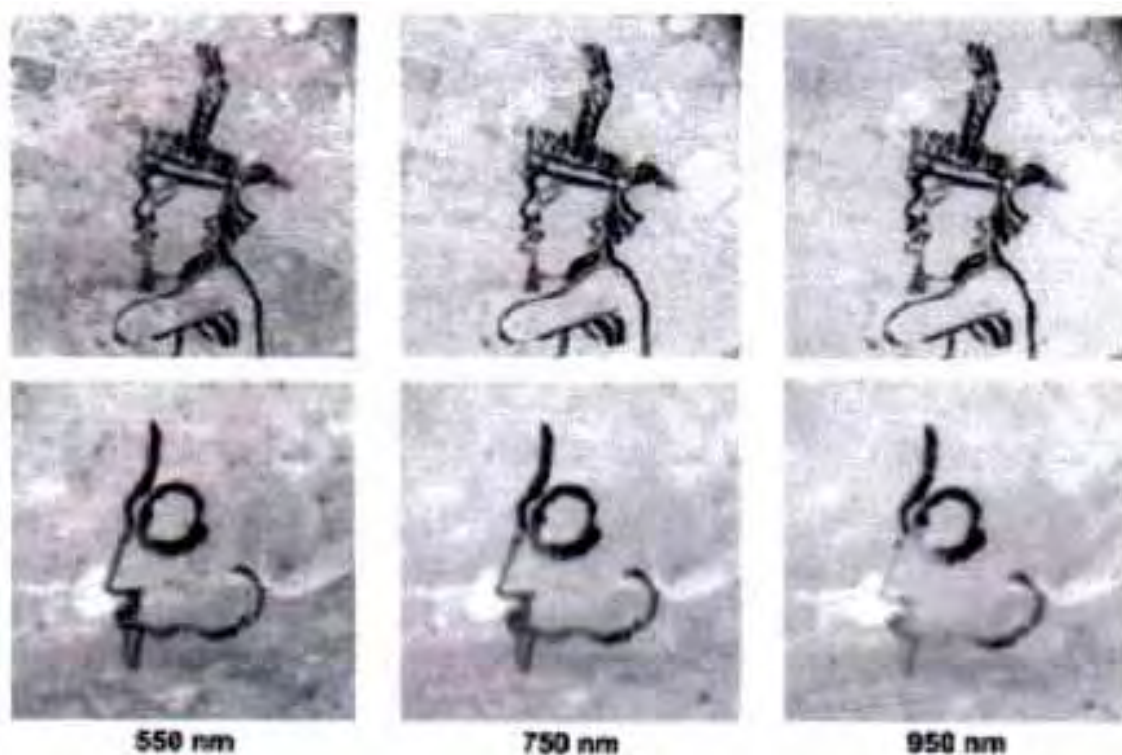


Figura 4. Imágenes multispectrales de los dibujos 83 (arriba) y 62 (abajo) de Naj Tunich.

Imágenes de Ejemplo

En la [Figura 4](#) se pueden observar imágenes multispectrales de dos dibujos de Naj Tunich. En la línea superior se ven imágenes de un enano de la realeza (dibujo 83), y en la línea inferior se ven imágenes de un perfil (dibujo 62)². El pigmento que se usó para el dibujo 83 probablemente haya sido hecho a base de carbón, puesto que permanece uniformemente oscuro. El dibujo 62 muestra evidencias de dos pigmentos diferentes, uno de los cuales se decolora gradualmente hacia el infrarrojo. La clasificación espectral revela manchas del pigmento más oscuro en el área decolorada, tal vez como resultado de algún retoque hecho en la antigüedad (Ware et al., 2000).

² Aquí se ha usado el sistema de numeración iniciado por Stone (1995) para los dibujos del corpus de Naj Tunich.

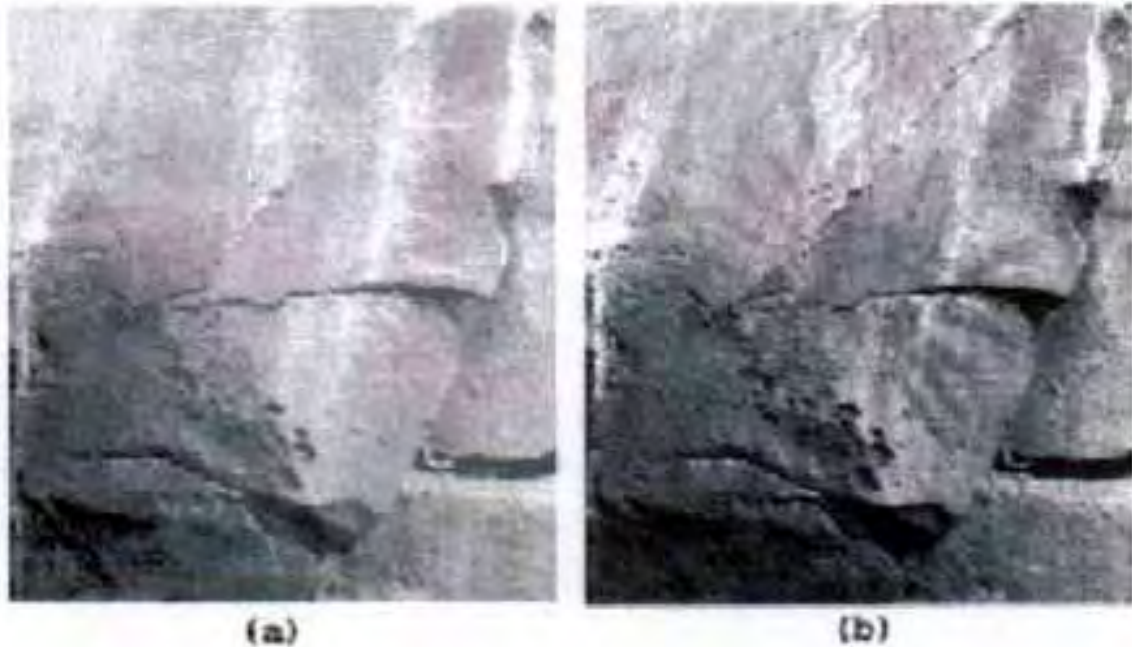


Figura 5. Imágenes multispectrales del dibujo C10 de Golondrinas a 1000 nm (a) y a 550 nm (b).

Casi todos los pigmentos tienden a decolorarse hacia el infrarrojo. Esta característica permite que las imágenes infrarrojas "vean a través" de los pigmentos de las pinturas y de los antiguos murales para revelar el dibujo subyacente hecho a base de carbón. Esta decoloración aparece ilustrada en las imágenes de arte rupestre del dibujo C10 de La Casa de las Golondrinas, Valle de Antigua, Guatemala (Robinson y Ware, 2001). Los rayos que parecen estar emanando de un sol se hacen visibles a 550 nm pero desaparecen a los 1000 nm. La [Figura 5](#) también ilustra la variación en el contraste de la imagen con la longitud de onda.



Figura 6. Lámina 49 de los rollos de la iglesia de Petra.

La [Figura 6](#) muestra la imagen en blanco y negro de la lámina 49 de la colección de rollos de la iglesia de Petra que el Centro Estadounidense de Investigaciones Orientales (*American Center of Oriental Research*), (ACOR), representó en imágenes multispectrales en Amán, Jordania. La escritura en estos fragmentos de pergaminos carbonizados es difícil de fotografiar por sus características de negro-sobre-negro. En la [Figura 7](#) se observa una imagen del tercer fragmento de la izquierda, abajo. Esta imagen a 550 nm muestra un contraste excelente y resulta tan clara como si se estuviera observando el original bajo un potente microscopio.

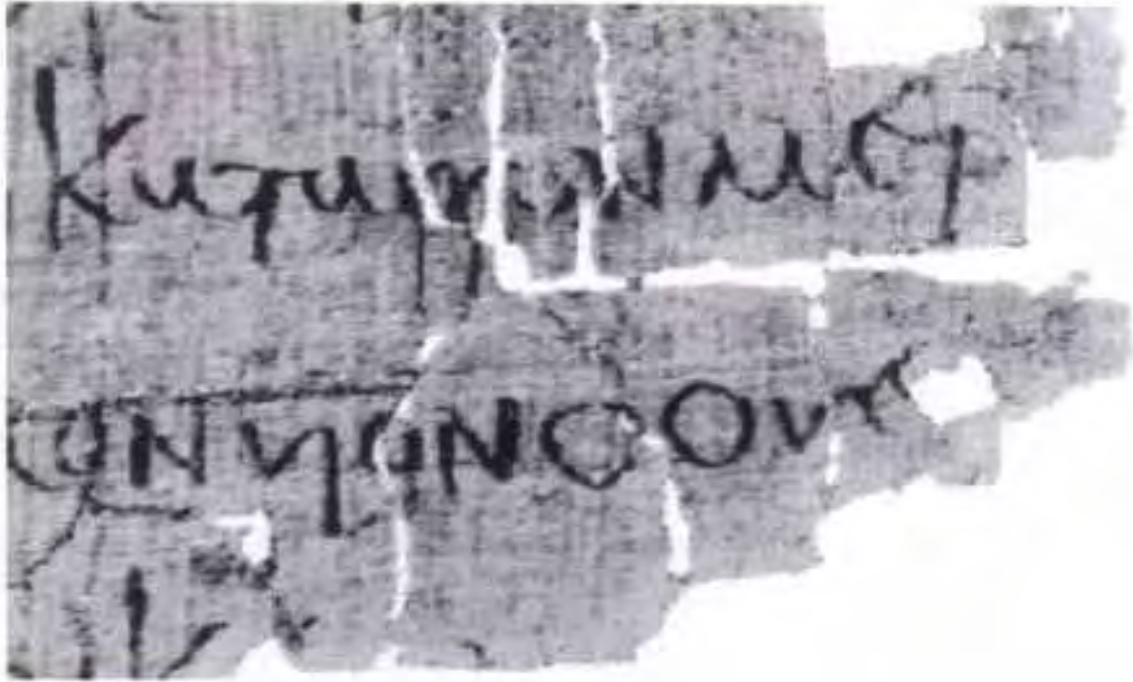


Figura 7. Una imagen multispectral a 550 nm de un fragmento de la Lámina 49 de los rollos de la iglesia de Petra.

El análisis de clasificación espectral ha mostrado que la tinta (probablemente hecha a base de carbón) permanece uniformemente negra, mientras que la reflectancia del papiro carbonizado varía con la longitud de onda (Ware et al., 2000). Esto causa que la longitud de onda, a fin de llegar al contraste óptimo de la imagen, varíe de fragmento en fragmento y dentro de un mismo fragmento. Comparativamente, los rollos carbonizados de Herculano, Italia, exhiben en forma uniforme un contraste excelente en la región de los 900-1000 nm, y un contraste pobre en las longitudes de onda visibles.

Conclusiones

El sistema de imágenes arqueológicas multispectrales descrito aquí, ha demostrado que puede representar eficazmente una amplia variedad de artefactos arqueológicos, entre ellos, documentos antiguos, rollos carbonizados, murales, dibujos, arte rupestre, e imágenes sobre cerámicas. El sistema de representación de imágenes ha podido ser adecuadamente transportado y usado en entornos que varían de laboratorios a museos, de selvas a cuevas. Los datos de imágenes multispectrales obtenidos, concertadamente con el procesamiento de imágenes espectrales asociado, ha dado lugar a estimulantes descubrimientos arqueológicos y a su comprensión.

Agradecimientos

El diseño y fabricación del sistema multiespectral de imágenes aquí descrito fue financiado por el Colegio de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Brigham Young. La investigación con imágenes multiespectrales de Naj Tunich fue financiada con subsidios de la Fundación para el Avance de los Estudios Mesoamericanos, Inc. (FAMSI) y del Centro de Estudios Avanzados en las Artes Visuales de la Galería Nacional de Arte. La investigación con imágenes espectrales en Golondrinas fue financiada con un subsidio de FAMSI. El proyecto de las imágenes multiespectrales de los rollos de la iglesia de Petra fue realizado conjuntamente por la Universidad Brigham Young y el Centro Estadounidense de Estudios Orientales (ACOR) de Amán, Jordania.

El diseño mecánico de la rueda de filtros es obra de Dean Schaeffer, de Space Dynamics Laboratory, y de Robert Perry, del Research Machine Shop de la Universidad Brigham Young. Robert también tuvo un papel preponderante en la fabricación de la rueda de filtros y en el diseño y fabricación del hardware asociado al sistema. También han colaborado Steven Booras, Ricky Fielding, Michael Ware y Troy Johnson. El software a medida para el control de la cámara fue creado por Craig Lindstrom de eSage, Pleasant Grove, Utah.

Todas las imágenes se han usado previa autorización de la Universidad Brigham Young, de Provo, Utah.

Lista de Figuras

[Figura 1.](#) Respuesta típica de los sensores de la Kodak 4.2i. Curva de Roper Scientific MASD, Inc.

[Figura 2.](#) Respuesta típica del filtro visible ajustable CRI. Curva de Cambridge Research Instrumentation, Inc.

[Figura 3.](#) Típico sistema de representación de imágenes multiespectrales instalado en Naj Tunich.

[Figura 4.](#) Imágenes multiespectrales de los dibujos 83 (arriba) y 62 (abajo) de Naj Tunich.

[Figura 5.](#) Imágenes multiespectrales del dibujo C10 de Golondrinas a 1000 nm (a) y a 550 nm (b).

[Figura 6.](#) Lámina 49 de los rollos de la iglesia de Petra.

[Figura 7.](#) Una imagen multiespectral a 550 nm de un fragmento de la Lámina 49 de los rollos de la iglesia de Petra.

Todas las imágenes han sido usadas previa autorización de la Universidad Brigham Young, de Provo, Utah.

Referencias Citadas

Miller, Mary

1997 "Imaging Maya Art," *Archaeology* mayo/junio, 74:3 págs. 34-40.

Belokon, William F., et al.

1977 *Multispectral Imagery Reference Guide*. Logicon Geodynamics, Inc.: Fairfax Virginia.

Roper Scientific, Inc.

2001 http://www.roperscientific.com/mega/pdfs/datasheets/megaplus/megaplus_4.2i.pdf, Mayo 2001.

Cambridge Research & Instrumentation, Inc.

2001 <http://www.cri-inc.com/data/pdf/5-061697.pdf>, Mayo 2001.

Ware, Gene A. y James E. Brady

1999 "Multispectral Analysis of Ancient Maya Pigments: Implications for the Naj Tunich Corpus," en *Center 19: Record of Activities and Research Reports June 1998-May 1999*. Washington D.C.: National Gallery of Art, Center for Advanced Study in the Visual Arts.

Ware, Gene A., Douglas M. Chabries, Richard W. Christiansen, James E. Brady, y Curtis E. Martin

2000 "Multispectral Analysis of Ancient Maya Pigments: Implications for the Naj Tunich Corpus." *Proceedings IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, VI:2489-2491.

Ware, Gene A., James E. Brady y Curtis E. Martin

2001 "Multispectral Imaging and Spectral Classification of Naj Tunich Pigments," PICS 2001: *Proceedings of the 54th Annual Conference of the Society for Imaging Science and Technology*, 22-25 de abril, Quebec, Canada.

Stone, Andrea

1995 *Images from the Underworld: Naj Tunich and the Tradition of Maya Cave Painting*. Austin: University of Texas Press.

Robinson, Eugenia J. y Gene A. Ware

2001 "Multispectral Imaging of La Casa de las Golondrinas Rock Paintings." Informe Final presentado a FAMSI.

Ware, Gene A., Douglas M. Chabries, Richard W. Christiansen, y Curtis E. Martin
"Multispectral Document Enhancement: Ancient Carbonized Scrolls." *Proceedings*
2000 *IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, VI:2486-
2488.

FAMSI © 2005: Eugenia J. Robinson y Gene A. Ware

Imágenes Multiespectrales de las Pinturas Rupestres de la Casa de las Golondrinas

Anexo B. Agrupamiento no supervisado para reducción de datos y análisis de imágenes arqueológicas multiespectrales, por *Curtis E. Martin, Academia de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, Colorado*, y *Gene A. Ware, Universidad Brigham Young*.

Tabla de Contenidos

[Resumen](#)

[Introducción](#)

[Cuantificación de Vectores](#)

[Agrupamiento por Formas de Espectral](#)

[Experimentos](#)

[Resultados y Análisis](#)

[Discusión](#)

[Sumario](#)

[Agradecimientos](#)

[Lista de Figuras](#)

[Referencias Citadas](#)

Resumen

Para cumplimentar el análisis de un agrupamiento de datos de imágenes multiespectrales, se propone una aproximación con cuantificación de vector. Se sugiere una medida de distorsión basada en la forma de los vectores de reflectancia espectral, y se explican las razones de esta elección. El algoritmo se usa para realizar análisis de agrupamientos de imágenes espectrales, tanto intra como inter-imágenes, de las pinturas arqueológicas de las cuevas. En imágenes simples, el algoritmo logra separar el pigmento del fondo de piedra, y logra distinguir entre dos tipos de pigmentos encontrados en la misma imagen. Cuando agrupa datos de imágenes múltiples, el algoritmo identifica dibujos que pueden haber sido creados con el mismo pigmento, mientras que simultáneamente identifica otros dibujos que probablemente se hayan hecho con pigmentos diferentes. Se discuten los desafíos que surgen cuando se usa esta aproximación en los análisis generales de agrupamientos, y se proporcionan soluciones posibles para estos desafíos. Si bien estos desafíos no son triviales, los resultados preliminares obtenidos hasta la fecha parecen lo suficientemente promisorios como para alentar estudios posteriores de la técnica propuesta.

Introducción

La representación de imágenes multiespectrales ha sido usada en el pasado en distintas aplicaciones de detección remota, siendo una de las más conocidas la representación satelital de la tierra para distintos propósitos de monitoreo terrestre. Sin embargo, en años recientes, la variedad de aplicaciones para la representación de imágenes multiespectrales se ha ampliado notablemente. Los científicos han recurrido a la representación de imágenes multiespectrales para llegar a una mayor comprensión del centro de la galaxia (Kirkland, Baker, y Ware, 2001), para recuperar textos de documentos antiguos y mutilados (Knox *et al.*, 2001, Ware *et al.*, 2000), y para poder realizar análisis no destructivos de pigmentos de pinturas en cuevas muy por debajo de la superficie de la tierra (Ware, Brady, y Martin, 2001).

Una de las tareas más importantes en el procesamiento de imágenes es la segmentación de las mismas – romper una imagen en sus partes constitutivas para hallar los elementos de interés dentro de ella. Mientras que para la segmentación convencional de una imagen habitualmente se usa la estructura espacial para aislar las diferentes partes de ésta, la representación multiespectral de imágenes aporta un eje adicional sobre el que puede realizarse dicha discriminación – el eje espectral. De hecho, la habilidad para llevar a cabo una discriminación espectral es precisamente la razón por la cual los sistemas de representación de imágenes multiespectrales son típicamente usados donde están. Virtualmente en todas las aplicaciones de la representación de imágenes multiespectrales, el primer interés característico de los investigadores es encontrar las regiones de la imagen que contienen espectros únicos, puesto que éstos corresponden a áreas en el objeto de la imagen que tienen composiciones químicas diferentes.

En este artículo se describe una técnica para la segmentación de imágenes multiespectrales que emplea un algoritmo de cuantificación de vector para agrupar los píxeles de la imagen multiespectral, en base a las similitudes de sus espectros medidos. El algoritmo de cuantificación de vectores se describe brevemente, como así también se explica su aplicación como algoritmo de agrupamiento para la segmentación de imágenes multiespectrales. A continuación se presentan los resultados de la aplicación del algoritmo a la representación de imágenes multiespectrales para la arqueología. Le sigue una breve discusión sobre algunos de los desafíos que implica usar esta aproximación para la segmentación de imágenes multiespectrales, y se ofrecen algunas sugerencias acerca de cómo resolver estos desafíos. Si bien al día de hoy algunos desafíos no resueltos exigen un cuidado especial a la hora de interpretar los resultados, los resultados iniciales obtenidos con la utilización de esta aproximación parecen lo suficientemente promisorios como para justificar los esfuerzos que se realicen en la búsqueda de la resolución de dichas dificultades.

Cuantificación de Vectores

La cuantificación de vectores (CV) (*vector quantization*, VQ), es un proceso para codificar el origen de una señal, por lo general una secuencia de vectores, por medio de la utilización de un juego fijo (o libro de códigos) de vectores prototípicos y una regla para asociar cada vector entrado con uno de los vectores del libro de códigos. Al usar la regla de asociación, el proceso de codificación se lleva a cabo por medio del reemplazo de cada vector entrado con el índice del libro de códigos de vectores que mejor lo representen. Para reconstruir la señal, cada índice codificado es reemplazado con el vector apropiado del libro de códigos. Como en la señal reconstruida cada vector no es la réplica exacta del vector que entró originalmente, la cuantificación de vectores introduce algunos errores (o distorsiones) en la señal. Este error se mide a través de una *medida de distorsión* – una fórmula matemática que proporciona una evaluación cuantificada de la diferencia entre un vector entrado y el vector del libro de códigos seleccionado para representarlo.

Con mucha frecuencia, es deseable minimizar la distorsión general esperada que impone un sistema de CV. Una regla que permitirá cumplir con este objetivo radica en elegir, para cada vector entrado, el prototipo del libro de códigos que produzca la distorsión mínima de dicho vector. A partir de cualquier juego de vectores únicos del libro de códigos, esta regla de asociación con la distorsión mínima produce una *separación* del espacio del vector entrado. Esto es, el espacio del ingreso se divide en un juego de celdillas que no se superponen, cada uno en torno a un vector diferente del libro de códigos, de tal manera que los vectores de origen dentro de una celdilla dada, están más próximos al prototipo de ese vector (en el sentido de la medida de la distorsión) que a ningún otro miembro del libro de códigos. A la inversa, a partir de una separación cualquiera del espacio de entrada, puede construirse un libro de códigos de distorsión mínima, encontrando un vector en el centro de cada una de las celdillas de la separación, de modo que la distorsión promedio en la que se incurre al reemplazar cada vector en la celdilla, por el prototipo propuesto, se minimice. Gray *et al.*, han demostrado que para todas las separaciones útiles y una amplia gama de medidas de distorsión, siempre puede construirse un conjunto como el mencionado, de un libro de código de vectores con una distorsión mínima (Gray, Keiffer, y Linde, 1979).

Al reconocer que puede construirse una separación con una distorsión mínima virtualmente para cada juego de vectores de un libro de códigos, y que un libro de códigos de distorsión mínima puede obtenerse virtualmente para todas las separaciones útiles, Linde, Buzo, y Gray (1980) propusieron un algoritmo iterativo eficiente (de ahora en más llamado el algoritmo de LBG) para diseñar un cuantificador óptimo de vectores para el origen de una señal dada. El algoritmo de LBG se inicializa a través de la elección arbitraria de un libro de códigos inicial con el número deseado de entradas para dicho libro de códigos. El primer paso iterativo es determinar la división de mínima distorsión del espacio entrado para este libro de códigos inicial. A continuación, el algoritmo

actualiza el libro de códigos, reemplazándolo con el juego de prototipos que minimice la distorsión de la división encontrada en el primer paso. El algoritmo continúa, alternativamente actualizando primero la división y más tarde el libro de códigos, hasta que la distorsión general obtenida por la división no cambia entre las iteraciones, más allá de un punto crítico especificado por el usuario. Las condiciones necesarias para garantizar la convergencia del algoritmo en un "buen" cuantificador, que son relativamente fáciles de lograr (Linde *et al.*, 1980), han sido formalmente expresadas en Gray *et al.*, (1979).

Para procesar imágenes multiespectrales en base a un contenido espectral, los datos de espectro múltiple son tratados como una distribución espacial de vectores de reflectancia espectral ij . Los índices i y j mantienen la ubicación espacial de cada vector en la imagen, mientras que el vector mismo contiene la reflectancia espectral del material ubicado en esa posición en el objeto. (Nótese que si bien estamos restringiendo nuestra discusión a los sujetos reflexivos, no hay razones para sospechar que las mismas técnicas aplicadas a imágenes de fuentes emisoras, por ejemplo, las imágenes astronómicas).

Al segmentar una imagen multiespectral, el primer objetivo es aislar los agrupamientos de píxeles unos de otros, que se corresponden con porciones del sujeto que tienen espectros característicos. Este proceso esencialmente consiste en dividir los datos del espacio de reflectancia espectral – buscamos agrupamientos que resulten únicos entre los distintos materiales que constituyen el sujeto representado en la imagen. Una vez que los vectores de la reflectancia espectral son asignados a agrupamientos, la distribución espacial de estos materiales constitutivos a lo largo y ancho de la imagen se pueden examinar observando cómo se distribuyen los agrupamientos en la imagen.

Si bien el foco principal del algoritmo de LBG está centrado en el desarrollo de un libro de códigos que produzca una distorsión mínima en la reconstrucción de la señal de entrada, un producto natural del algoritmo es la división del espacio de entrada que acompaña al libro de códigos óptimo. Así, mientras que los agrupamientos (o sea, las divisiones) obtenidos por el algoritmo de LBG pueden no corresponder directamente con los agrupamientos de los datos "que se dan naturalmente", resulta razonable al menos tratar de usar el algoritmo de LBG como un medio para el análisis de agrupamientos de las imágenes multiespectrales.

Hay dos rasgos del algoritmo de LBG que lo hacen más atractivo para ser evaluado como una herramienta de agrupamiento de datos multiespectrales. Primero, no necesita demasiado en el terreno de las suposiciones en cuanto a la distribución de los datos. Debido a la alta dimensionalidad, por lo general es difícil asumir demasiado en términos de cómo los datos multiespectrales se distribuirán en el espacio de reflectancia espectral. Sin embargo, la intuición física proporciona al menos la posibilidad de que los datos, de hecho, se distribuyan en algún tipo de forma de agrupamiento. El segundo rasgo que hace atractivo al LBG para agrupar datos multiespectrales, es su generalidad con respecto a la medida de distorsión. Esto posibilita la selección de una medida de

distorsión para el proceso de agrupamiento que tiene un mayor atractivo intuitivo y físico que la medida de distorsión del error directo frecuentemente usado.

Agrupamiento por Forma Espectral

Al elegir una medida de distorsión para usar, ya sea en la cuantificación de un vector, o en el análisis de agrupamientos, es importante elegir una medida que tenga que ver con los datos. En el caso de los datos multiespectrales, particularmente de los datos recogidos bajo condiciones no uniformes de iluminación, una medida ideal de distorsión deberá ser sensible a las diferencias en la forma espectral, mientras que también deberá ser relativamente insensible a las variaciones de la intensidad de la luz general. Esto es así porque el objetivo del análisis de los agrupamientos multiespectrales es encontrar grupos de píxeles que provengan de materiales similares en el sujeto representado. Como los diferentes materiales por lo general pueden estar caracterizados únicamente por su reflectancia espectral, se esperaría que los píxeles que representan un determinado material en el sujeto tuvieran vectores de reflectancia espectral similares.

Si se piensan los vectores de datos multiespectrales como vectores de posición en el espacio euclidiano de n -dimensiones, cada forma espectral posible corresponde a una dirección específica en ese espacio (n corresponde al número de elementos en cada vector de reflectancia). Entonces, aumentar la magnitud de la iluminación aumentaría cada componente espectral por un factor constante, el cual simplemente podría cambiar la longitud del vector resultante sin afectar su dirección. Con este pensamiento en mente, dado un vector x de datos multiespectrales y un prototipo de agrupamiento y , la diferencia (o distorsión) entre estos dos vectores en el espacio de reflectancia espectral de la n -dimensión puede ser computada en términos del ángulo entre sus direcciones como

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = 1 - \cos(\theta), \quad (1)$$

de donde θ es el ángulo entre los vectores \vec{x} y \vec{y} . Con esta formulación particular, los vectores que tienen la misma forma (por ejemplo, uno al lado del otro en la misma dirección) tendrán una distorsión de cero, sin que importen las diferencias de iluminación, mientras que los que son reflejos unos de otros, tendrán una distorsión máxima de dos.

Por su relación con el ángulo entre los dos vectores en el espacio de reflectancia espectral, hay quien ha denominado a esta medida de distorsión "medida de ángulo espectral" (MAE) "*spectral-angle measure*," (SAM) (Kruse, 2000). Además de su fuerte atractivo intuitivo para ser usado en el agrupamiento de datos multiespectrales, esta medida de distorsión también es bastante simple de

computar. Usando el análisis de los vectores, una forma computacional más simple de Eq. (1) podría expresarse como

$$d(\bar{x}, \bar{y}) = 1 - \hat{x} \cdot \hat{y}, \quad (2)$$

de donde \hat{x} y \hat{y} son unidades de vectores obtenidos por la división de cada vector por su respectiva magnitud. De esta forma, al preparar los datos de la imagen multispectral para el análisis de agrupamientos usando la medida de ángulo espectral en el algoritmo de LBG, el último paso previo al procesamiento es normalizar el vector de cada espectro de pixel dividiéndolo por su magnitud. A su vez, cada vez que los vectores del libro de códigos sean nuevamente computados en el algoritmo de LBG, deben ser nuevamente normalizados para asegurar que continúen siendo también unidades de vectores. El hecho de incorporar la medida del ángulo espectral al algoritmo de LBG produce el algoritmo de agrupamiento propuesto, al que de aquí en adelante nos referiremos como algoritmo de SAM/LBG.

Porque se sirve de un índice para no perder la pista de la división de los datos de entrenamiento a lo largo del proceso de diseño de CV, el algoritmo de LBG puede proporcionar este elemento como una información de salida que le dice al agrupamiento a cuál está asignado cada pixel. Al asignar un único color al índice de cada agrupamiento, este índice puede usarse para crear una imagen a color falsa de los resultados del agrupamiento, lo que es útil al determinar el valor de los resultados obtenidos..

Experimentos

Juego de Datos de la Imagen Multispectral

El algoritmo de SAM/LBG se aplicó a un juego de imágenes multispectrales de artefactos arqueológicos (pinturas en cuevas). Las imágenes se tomaron usando una Cámara Kodak Megaplug (Modelo 4.2i) cuya definición espectral se obtuvo a través de un juego de filtros de interferencia óptica montados en una rueda de filtros. El juego completo de filtros tenía longitudes de onda centrales que iban de los 400 a los 1000 nm en incrementos de 50 nm, y el ancho de banda de cada filtro era de 40 nm. Los anillos y las unidades estroboscópicas auxiliares proporcionaron la fuente de iluminación para la representación de las imágenes (Ware, Chabries, y Baker, 2001). Para el análisis sobre el cual aquí se informa, sólo se usaron las imágenes de los 450 a los 950 nm.

Preparación del Juego de Datos

Previamente a poner en práctica el algoritmo de LBG con los datos de las imágenes multispectrales, se requirió de varios pasos previos al procesamiento, entre ellos, segar cada imagen para que incluyera sólo la pintura

de interés, realizando un proceso de registro de banda a banda para asegurar (todo lo que fuera posible) que cada pixel en cada una de las bandas representara la misma parte del sujeto, y realizando un proceso de ecualización de la iluminación que respondiera a las diferentes condiciones de iluminación entre las distintas bandas. Una tarjeta común con la escala de grises que se incluyó en cada imagen de banda espectral, facilitó el último de estos procesos. Luego de haber completado estos pasos, cada vector de reflectancia espectral se normalizó a la magnitud de una unidad como preparación para el agrupamiento.

Tareas del Agrupamiento de Datos

Se intentaron dos tareas de agrupamientos de datos usando el algoritmo de SAM/LBG. En la primera tarea, el algoritmo se aplicó a imágenes multispectrales individuales para asegurar que produjera una división limpia entre los pixeles pigmentados en el dibujo y los del fondo rocoso. Como segunda tarea, se hizo una "imagen" compuesta multispectral reuniendo los espectros medidos de "muestras" pigmentadas de distintos dibujos, y se aplicó el algoritmo a este juego de datos mixtos a fin de ver si sugerían algunas similitudes o diferencias interesantes entre los vectores de reflectancia espectral de los distintos pigmentos de los diferentes dibujos.

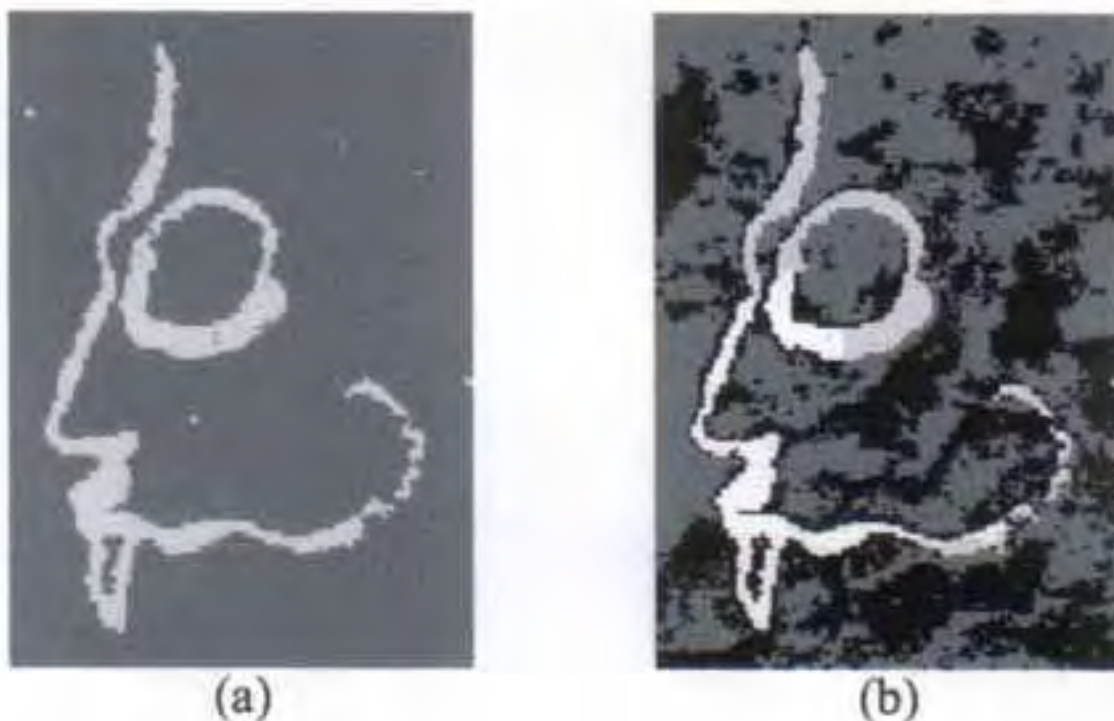


Figura 1. Resultados de los agrupamientos por SAM/LBG para el Dibujo 62: (a) dos agrupamientos, (b) cuatro agrupamientos.

Resultados y Análisis

Tarea 1: Agrupamientos Intra-Imágenes

Los resultados del algoritmo de agrupamiento de LBG para la primera tarea se pueden observar, para dos dibujos, en la [Figura 1](#), arriba, y en la [Figura 2](#), abajo. Para estos dos dibujos, los prototipos iniciales para los grupos de cuatro agrupamientos se obtuvieron sumando y restando un pequeño vector al azar a cada uno de los prototipos finales de los grupos de dos agrupamientos. Estos resultados parecen bastante favorables – en ambos dibujos la aplicación en dos agrupamientos produce una separación razonable del pigmento y la roca, y la aplicación en los cuatro agrupamientos, subdivide la roca y los grupos de pigmentos en dos juegos cada uno. Una observación cuidadosa de los espectros de estos dibujos revela que en realidad, existen al menos dos tipos distintos de pigmentos en cada dibujo..

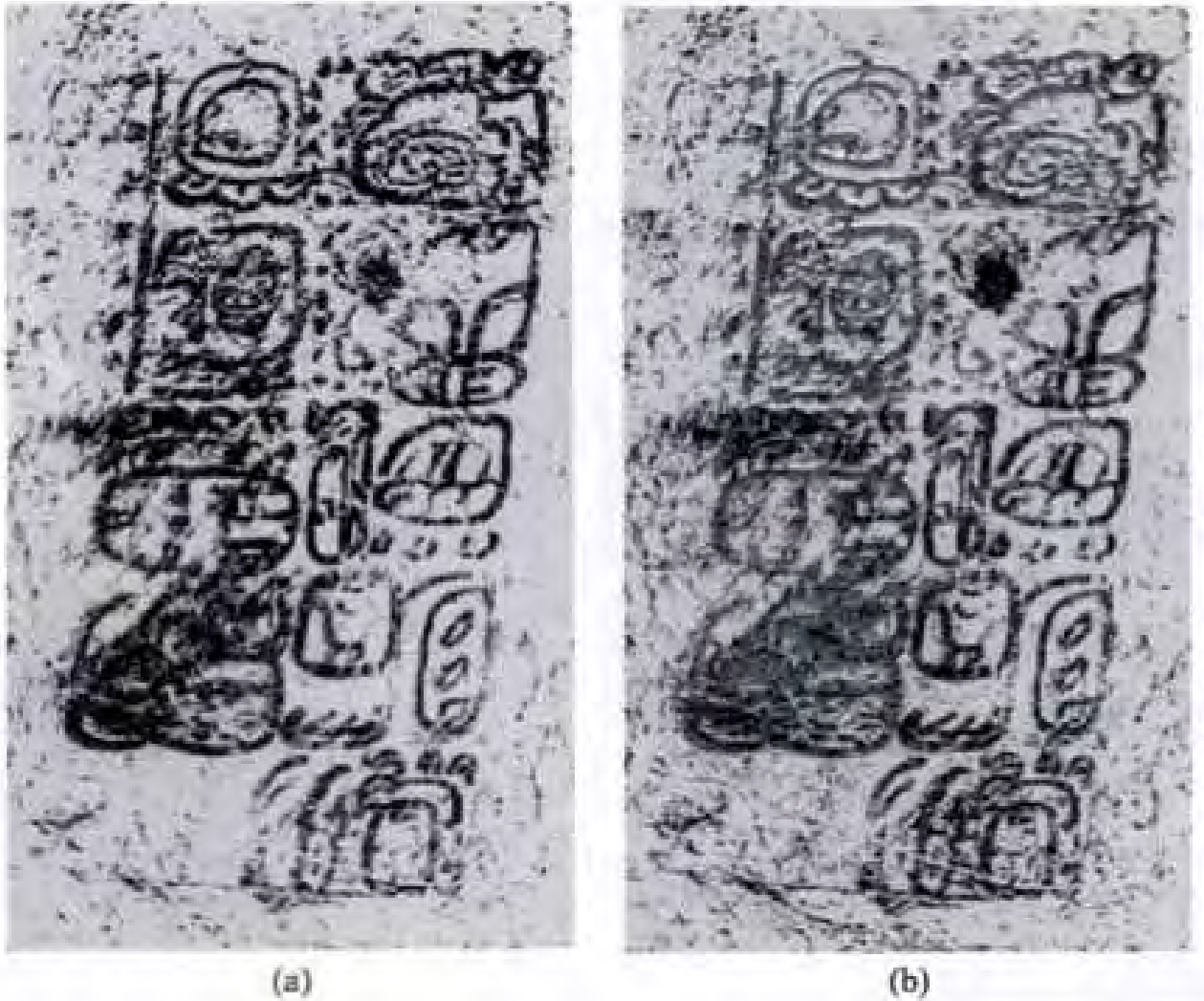


Figura 2. Resultados de los agrupamientos por SAM/LBG para el Dibujo 62: (a) agrupamientos, (b) cuatro agrupamientos (representados en cuatro escalas de grises diferentes).

Tarea 2: Agrupamiento Inter-Imágenes

Con la segunda tarea se intentó buscar similitudes y diferencias en los espectros de pigmentos a través de varios dibujos. Para cumplimentar esta tarea, los datos multispectrales de dieciséis muestras de píxeles de 100x100 de las áreas pigmentadas de catorce dibujos, fueron colocados unos junto a otros para formar una "imagen" multispectral compuesta. Se eligieron dieciséis vectores arbitrarios como entradas iniciales del libro de códigos, y luego se aplicó, dieciséis veces, el algoritmo de SAM/LBG al juego de datos multispectrales. En la primera pasada, el algoritmo buscó dieciséis agrupamientos, y en cada pasada sucesiva, el número de agrupamientos deseados iba disminuyendo de uno en uno. Este esquema de múltiples pasadas fue adoptado porque no había ninguna manera sencilla de saber de antemano cuántos tipos diferentes de

pigmentos habían sido seleccionados, y queríamos determinar de qué manera cambiaría el agrupamiento, en la medida en que cada vez se buscaran menos y menos agrupamientos.

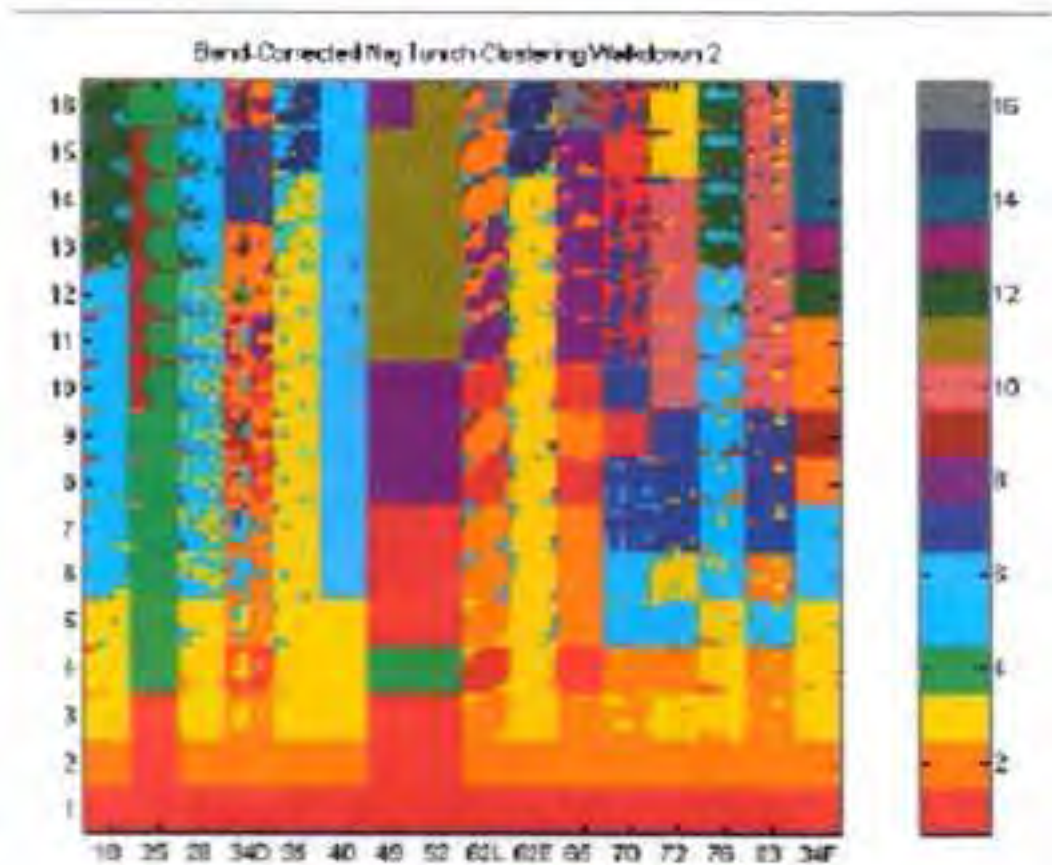


Figura 3. Dieciséis aplicaciones del algoritmo de SAM/LBG aplicadas a una imagen compuesta de muestras de pigmentos. Cada hilera corresponde a los resultados obtenidos mientras se buscaba una cantidad distinta de agrupamientos.

La [Figura 3](#) muestra los resultados obtenidos por estas dieciséis aplicaciones del algoritmo de SAM/LBG en la imagen multiespectral compuesta de dieciséis muestras de pigmentos. Mientras que resulta un tanto difícil distinguir los dieciséis agrupamientos en la hilera superior de esta representación de la escala de grises, nótese que las columnas marcadas como 49 y 52 muestran el mismo tono de gris en cada hilera, con la excepción de la hilera 16, mientras que las columnas marcadas 62L y 65, son esencialmente del mismo nivel de gris en cada hilera desde la hilera 11 y para abajo hasta la hilera 1. (El color cambia de hilera a hilera como consecuencia de la asignación un tanto arbitraria de color al índice del agrupamiento. Lo importante a tener en cuenta es que las dos columnas en cada par son del mismo color en cada hilera mencionada). Estos resultados implican que los espectros de estas diferentes muestras de

pigmentos son tan similares que estos pares de dibujos (49/52 y 62L/65), pueden de hecho contener los mismos pigmentos (o por lo menos pigmentos muy similares).

Discusión

En tanto que los resultados obtenidos con el algoritmo de SAM/LBG parecen ser bastante razonables, hay algunas cuestiones que merecen ser consideradas con todo cuidado.

Agrupamientos "naturales" separados o amontonados

La primera cuestión a tener en cuenta es el hecho de que el algoritmo de LBG (y como consecuencia, nuestro nuevo algoritmo), está diseñado para encontrar exactamente el mismo número de agrupamientos que ha solicitado el usuario. Si tiene que subdividir un agrupamiento "natural" o juntar dos de estos agrupamientos para producir el número de agrupamientos solicitado, lo hará. Por ejemplo, si un usuario intenta encontrar cuatro agrupamientos en un juego de datos que naturalmente marca tres agrupamientos distintos, el algoritmo, de alguna manera, separará uno de los tres agrupamientos a fin de formar el cuarto agrupamiento. De la misma manera, si el usuario solicita dos agrupamientos donde hay tres grupos naturales en los datos, el algoritmo se verá forzado a agrupar parte o la totalidad de un grupo en uno de los grupos restantes o en ambos. Para finalizar, no es difícil imaginar una distribución en la cual el algoritmo tendría que dividir dos grupos "naturales" por la mitad para luego reagrupar las mitades, lo que daría como resultado dos agrupamientos "mestizos". Todos estos errores posibles se presentan como consecuencia del hecho que el algoritmo de LBG está diseñado para minimizar los errores en la reconstrucción del proceso de CV de codificación, y no para encontrar el juego de agrupamientos "naturales" en los datos. En consecuencia, tratar de usar el algoritmo de LBG para realizar análisis de agrupamientos, en realidad puede dar cabida a abundantes errores.

Se han explorado brevemente dos maneras de superar esta dificultad, aunque los resultados suficientes como para sacar conclusiones definitivas todavía no han sido alcanzados. La primera aproximación es la que se ilustra en la [Tarea 2](#), más arriba. En tanto que es imposible visualizar los grupos de datos en un espacio de 6 dimensiones, por medio de la realización de un procedimiento cuidadosamente controlado que va reduciendo gradualmente el número de agrupamientos obtenidos de un juego constante de puntos de inicio, es posible llegar a comprender cómo las diferentes partes de los datos se relacionan unas con otras. La segunda aproximación, inspirada por Martinetz y Schulten (1980) implica medir la densidad de los datos de entrenamiento entre los prototipos adyacentes, para identificar los casos en los que los agrupamientos naturales puedan estar divididos.

Mínimos locales vs. globales

Otra cuestión a tener en cuenta es si el algoritmo converge en el punto mínimo absoluto, o se queda trabado en un mínimo local. Como en realidad no hay nada que evite que el algoritmo converja a un mínimo local, la solución producida depende un tanto de la condición inicial que se elija. Linde, Buzo y Gray anticiparon este problema y propusieron una solución para el mismo (1980), pero los efectos de dicha solución propuesta, en la aplicación de un análisis de agrupamientos de su algoritmo, todavía deben ser estudiados.

Sumario

Ya hemos mostrado de qué manera el algoritmo desarrollado por Linde, Buzo y Gray para diseñar un cuantificador óptimo de vectores puede adaptarse al uso de análisis de agrupamientos de datos de imágenes multiespectrales. El algoritmo resulta atractivo porque no requiere de excesivas suposiciones en cuanto a la real distribución de los datos, y también se lo puede implementar con una amplia variedad de medidas de distorsión. Hemos discutido lo apropiado de la medida del ángulo espectral como una medida de distorsión para usar en el agrupamiento de los datos de las imágenes multiespectrales, y hemos mostrado cómo esta medida puede ser usada en el marco del algoritmo de LBG para obtener una separación de los pigmentos de las rocas sin pintar, aparentemente razonable. Nuestros resultados también demuestran que es posible lograr un grado de discriminación todavía más marcado, cuando mostramos varios ejemplos donde las similitudes entre pigmentos, al igual que las diferencias, son identificadas por el algoritmo.

Si bien estos resultados son prometedores, somos conscientes de que este acercamiento puede tener sus límites en lo que tiene que ver con su utilidad para el análisis de los agrupamientos de los datos multiespectrales. Hemos identificado dos dificultades que pueden surgir a partir del uso de un algoritmo para diseñar un cuantificador de vectores como herramienta para el análisis de agrupamientos, y hemos mencionado algunas ideas sobre cómo actuar frente a estas dificultades. Serán necesarios estudios ulteriores para finalmente poder llegar a responder si estas dificultades podrán o no ser superadas. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta el momento parecen ser lo suficientemente precisos como para motivarnos a realizar estos estudios indispensables.

Agradecimientos

El proyecto de investigación de representación de imágenes multiespectrales de Naj Tunich fue financiado por becas de la Fundación para el Avance de los Estudios Mesoamericanos, Inc. (FAMSI) y por el Centro para Estudios Avanzados en las Artes Visuales, de la Galería Nacional de Arte.

Todas las imágenes han sido usadas previa autorización de la Universidad Brigham Young, de Provo, Utah.

Lista de Figuras

[Figura 1.](#) Resultados de los agrupamientos por SAM/LBG para el Dibujo 62: (a) dos agrupamientos, (b) cuatro agrupamientos.

[Figura 2.](#) Resultados de los agrupamientos por SAM/LBG para el Dibujo 62: (a) agrupamientos, (b) cuatro agrupamientos (representados en cuatro escalas de grises diferentes).

[Figura 3.](#) Dieciséis aplicaciones del algoritmo de SAM/LBG aplicadas a una imagen compuesta de muestras de pigmentos. Cada hilera corresponde a los resultados obtenidos mientras se buscaba una cantidad distinta de agrupamientos.

Todas las imágenes fueron usadas previa autorización de la Universidad Brigham Young, de Provo, Utah.

Referencias Citadas

Kirkland, J.S., D.J. Baker y G.A. Ware

2001 "Principal Components Data Fusion of Infrared Telescope Multispectral Images of the Galactic Center," Presentado en *SCI2001*, Orlando, FL.

Knox, K., *et al.*

2001 "Multispectral Imaging of the Archimedes Palimpsest," *Proceedings of the 2001 Annual Conference of the Society for Imaging Science and Technology: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference*, págs. 206-210.

Ware, G.A., *et al.*

2000 "Multispectral Document Enhancement: Ancient Carbonized Scrolls," *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, VI:2486-2488.

Ware, G.A., J.E. Brady y C.E. Martin

2001 "Multispectral Imaging and Spectral Classification of Naj Tunich Pigments," *Proceedings of the 2001 Annual Conference of the Society for Imaging Science and Technology: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference*, págs. 211-214.

Gray, R.M., J.C. Keiffer y Y. Linde

1979 "Locally Optimal Block Quantization for Sources without a Statistical Model," Stanford University Information Systems Lab Technical Report No. L-904-1, Mayo, Stanford, CA.

Linde, Y., A. Buzo, y R.M. Gray

1980 "An Algorithm for Vector Quantizer Design," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. COM-28, págs. 85-95.

Kruse, F.A.

2000 *Introduction to Hyperspectral Data Analysis*, Boulder: Analytical Imaging and Geophysics.

Ware, G.A., D.M. Chabries y D.J. Baker

2001 "Multispectral Imaging for Archaeology," Presentado en *SCI2001*, Orlando, FL.

Martinetz, T. y K. Schulten

1980 "Topology Representing Networks," *Neural Networks*, Vol. 7, págs. 507-522.