

samiento de imágenes puede realizarse a la salida de cada una de las etapas de la Figura 1.6. Se observa que no todas las aplicaciones del procesamiento de imágenes necesitan la complejidad de interacciones implícita en la Figura 1.6. Numerosas aplicaciones prácticas se realizan mediante las funciones correspondientes al camino exterior de la Figura 1.6. De hecho, en algunos casos ni siquiera son necesarios todos esos módulos. Por ejemplo, el realce de la imagen para interpretaciones visuales humanas rara vez va más allá de la etapa de preprocesamiento. En general, las funciones del procesamiento que incluyen reconocimiento e interpretación están asociadas con las aplicaciones del análisis de imágenes en las que el objetivo es la extracción automática—o incluso parcialmente automática—de información de una imagen. El reconocimiento de caracteres es sólo un ejemplo de ello; a lo largo del libro se encontrarán otras aplicaciones.

## 1.4. Elementos de los sistemas de procesamiento digital de imágenes

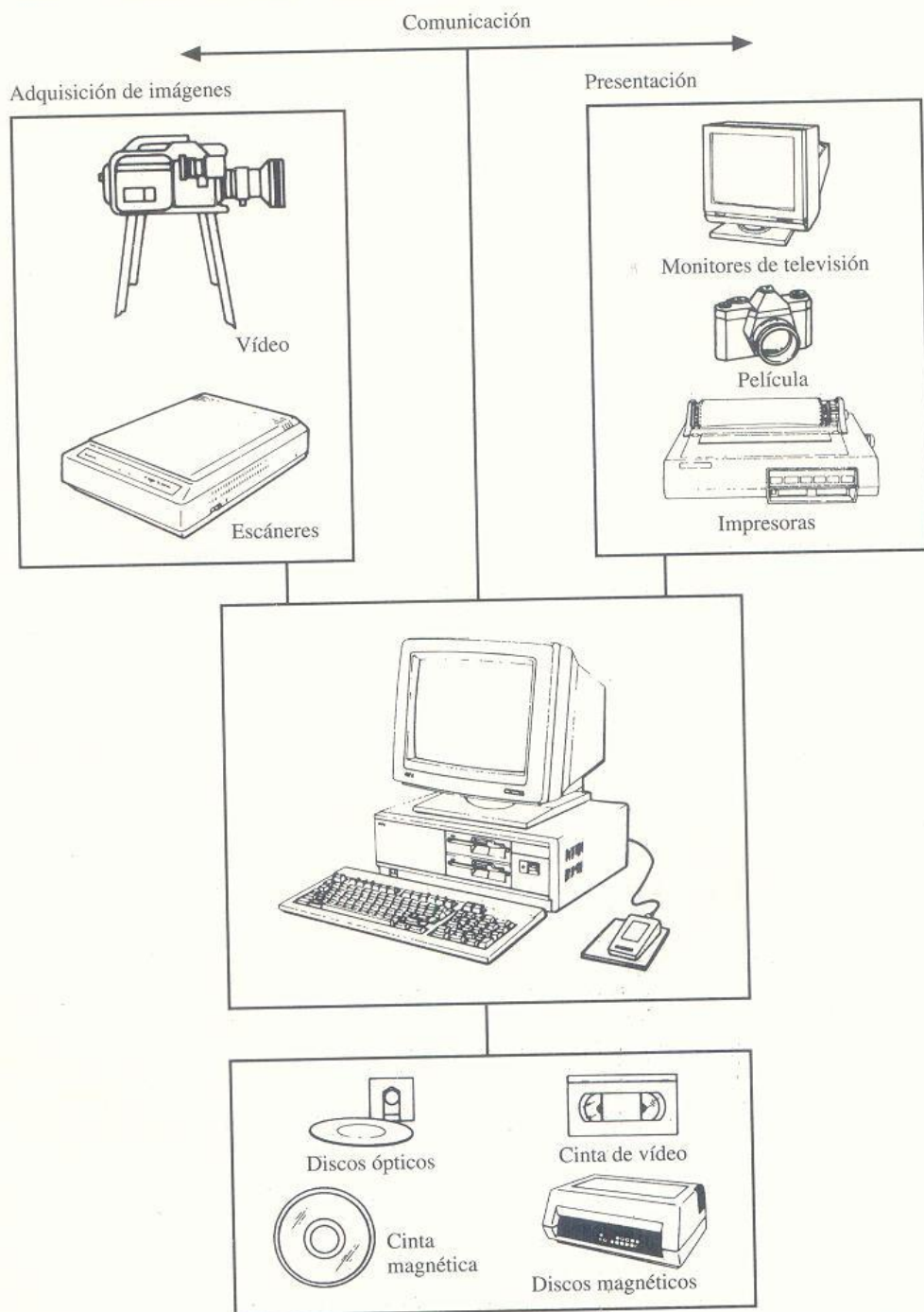
Los elementos de un sistema de propósito general capaz de realizar las operaciones de tratamiento digital de imágenes, que se acaban de presentar en la Sección 1.3, se muestran en la Figura 1.7. Este tipo de sistema generalmente lleva a cabo: 1) adquisición, 2) almacenamiento, 3) tratamiento, 4) comunicación y 5) presentación de imágenes.

### 1.4.1. Adquisición de imágenes

Para la adquisición digital de imágenes se necesitan dos elementos. El primero es un dispositivo físico sensible a una determinada banda del espectro de energía electromagnética (como las bandas de rayos X, ultravioleta, visible o infrarrojo) y que produzca una señal eléctrica de salida proporcional al nivel de energía detectado. El segundo, denominado *digitalizador*, es un dispositivo para convertir la señal de salida del sistema sensible a forma digital.

Como ejemplo, considérese la base de un sistema de imágenes de rayos X. La radiación de una fuente de rayos X se dirige a un objeto, al otro lado del cual se coloca un medio sensible a los rayos X. De esta forma en el medio sensible se forma una imagen de los distintos componentes (como huesos o tejidos) que tienen varios niveles de absorción de rayos X. El propio medio puede ser una película fotográfica, una cámara de televisión combinada con un convertidor de rayos X a fotones, o un sistema discreto de detectores, cuyas salidas estén combinadas para reconstruir una imagen digital.

Otra amplia categoría de sensores está relacionada con la luz visible e infrarroja. Entre los dispositivos más frecuentemente empleados con este fin se



**Figura 1.7.** Elementos funcionales básicos de un sistema de procesamiento de imágenes: adquisición, almacenamiento, procesamiento, comunicación y presentación. Las componentes de cada cuadro son ejemplos de los posibles dispositivos a emplear.



encuentran los microdensitómetros, diseccionadores de imágenes, cámaras vidicon y matrices de detectores fotosensibles de estado sólido. El primer dispositivo necesita que la imagen a digitalizar esté en forma de transparencia (como un negativo de película) o de fotografía. Las cámaras vidicon y las matrices de elementos de estado sólido pueden aceptar imágenes grabadas de esta forma y también pueden digitalizar imágenes naturales que posean el suficiente nivel de intensidad luminosa para excitar al detector.

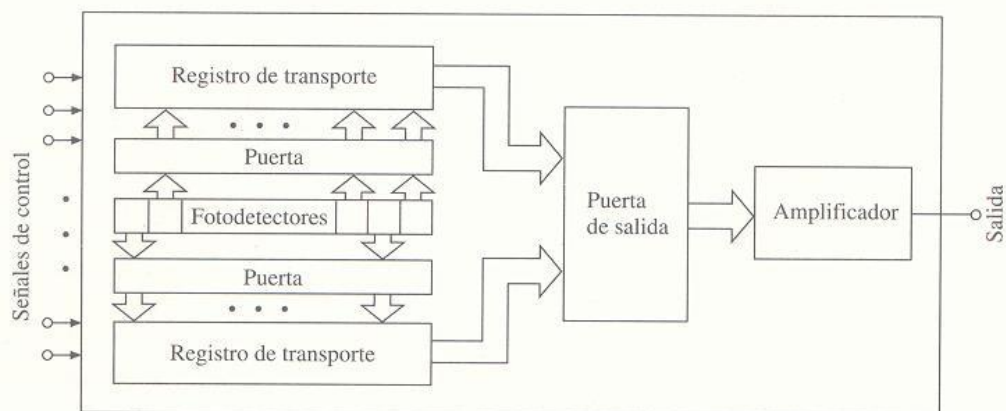
En los microdensitómetros, la transparencia o fotografía se monta en un soporte plano o se arrolla alrededor de un tambor. El barrido se realiza dirigiendo un haz luminoso (que puede ser un láser) sobre la imagen y desplazando el soporte o girando el tambor en relación al haz. En el caso de transparencias el haz pasa a través de la película, mientras que en el caso de fotografías se refleja por la superficie de la imagen. En ambos casos el haz se enfoca sobre un fotodetector y el nivel de gris de cada punto de la imagen es grabado por el detector en función de la intensidad del haz. Para obtener una imagen digital sólo se permiten en la salida valores discretos de la intensidad y de la posición. Aunque los microdensitómetros son dispositivos lentos, son capaces de llegar a elevados grados de precisión en la posición debido esencialmente a la naturaleza continua de la traslación mecánica empleada en el procesamiento de digitalización.

La operación de las cámaras de vidicon se basa en el principio de la fotoconductividad. Una imagen enfocada en la superficie de un tubo produce un patrón de conductividad variable que corresponde a la distribución de brillo en la imagen óptica. Un haz independiente de electrones, enfocado finamente, barre la superficie posterior del material fotoconductor y, por neutralización de la carga, crea una diferencia de potencial que produce en un colector una señal proporcional al patrón de brillo de la entrada. Cuantificando esta señal y la correspondiente posición del haz de barrido, se obtiene una imagen digitalizada.

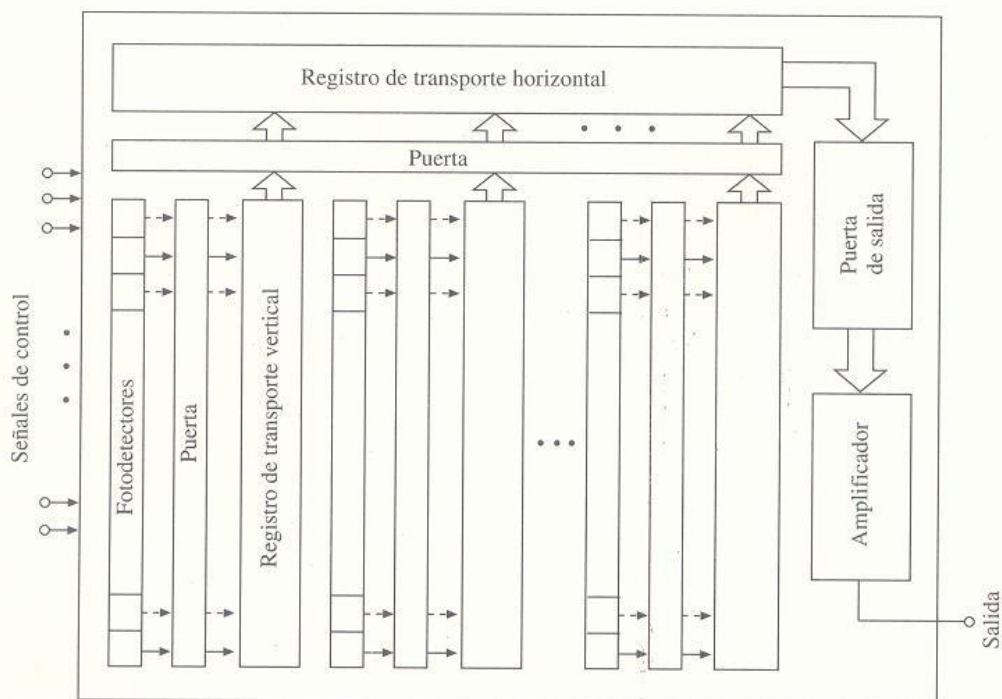
Las matrices de elementos de estado sólido están compuestas por elementos discretos de silicio, denominados *fotodetectores*, que tienen un voltaje de salida proporcional a la intensidad de la radiación incidente. Las matrices de estado sólido están organizadas siguiendo una de las dos organizaciones geométricas principales: los *sensores de barrido de línea* y los *sensores de área*. Un sensor de barrido de línea está constituido por una fila de fotodetectores y produce una imagen bidimensional por el movimiento relativo entre la escena y el detector. Por ejemplo, los sensores de barrido de línea se utilizan ampliamente en los escáneres de soporte plano. Un sensor de área está constituido por una matriz de fotodetectores y por ello es capaz de capturar una imagen de la misma forma que, por ejemplo, un tubo vidicon. Una de las grandes ventajas de las matrices de sensores de estado sólido es que pueden operar a velocidades muy altas (como, por ejemplo, 1/10.000 seg), lo que los hace ideales en aplicaciones donde se necesite *congelar* el movimiento.

La tecnología utilizada en los sensores de estado sólido se basa principal-

mente en los dispositivos de carga acoplada (o CCD, de su nombre en inglés *charge-coupled devices*). Como se muestra en la Figura 1.8(a), un CCD típico de barrido de línea contiene una fila de fotodetectores, dos puertas de transferencia, utilizadas para volcar el contenido de los elementos de la imagen en los denominados registros de transporte, y una puerta de salida, empleada



(a)



(b)

**Figura 1.8.** (a) Sensor CCD de barrido de línea; (b) sensor CCD de área.



para volcar el contenido de los registros de transporte en un amplificador, el cual proporciona una señal de salida proporcional al contenido de la fila de fotodetectores.

Las matrices de área de elementos de carga acoplada son similares a las de sensores de barrido de línea, excepto que aquí los fotodetectores están dispuestos en forma de matriz y se utiliza una combinación de registro de transporte/puerta para separar columnas de fotodetectores, como se muestra en la Figura 1.8(b). Los contenidos de los fotodetectores con numeración impar se llevan secuencialmente a los registros de transporte vertical y de ahí al registro de transporte horizontal. El contenido de este registro se introduce en un amplificador cuya salida es una línea de vídeo. Repitiendo este proceso para las líneas pares se completa el segundo campo de una imagen de televisión entrelazada. El barrido se repite 30 veces por segundo.

Los sensores de barrido de línea con resoluciones desde 256 hasta 4.096 elementos son muy comunes, mientras que la resolución de los sensores de área varía entre los  $32 \times 32$  elementos del extremo inferior a los  $256 \times 256$  elementos de un sensor de resolución media. También existen dispositivos de mayor resolución con  $640 \times 480$  elementos, así como sensores con resoluciones del orden de los  $1.280 \times 1.024$  elementos, disponibles comercialmente a precios relativamente altos pero a menudo justificables. A precios mayores existen sensores de gran resolución que utilizan el movimiento mecánico de un chip CCD para alcanzar los  $2.048 \times 2.048$  elementos. Las matrices de CCD están normalmente empaquetadas como en las cámaras de televisión. La digitalización de la imagen se logra al enviar la señal de salida de vídeo de estas cámaras a un digitalizador, como se ha mencionado anteriormente.

## 1.4.2. Almacenamiento

Una imagen de 8 bits y  $1.024 \times 1.024$  pixels necesita un millón de bytes de memoria. Así el proporcionar la capacidad de almacenamiento adecuada suele ser un reto en el diseño de los sistemas de tratamiento de imágenes. El almacenamiento digital para aplicaciones de procesamiento de imágenes cae de lleno en tres categorías básicas: 1) almacenamiento a corto plazo, para ser empleado durante el procesamiento; 2) almacenamiento en línea, para una reutilización relativamente rápida, y 3) almacenamiento en archivo, caracterizado por un acceso poco frecuente. El tamaño de la información almacenada se mide en bytes (8 bits), Kbytes (kilobytes, o miles de bytes), Mbytes (megabytes, o millones de bytes), Gbytes (gigabytes, o miles de millones de bytes) y Tbytes (terabytes, o billones de bytes).

Un método para obtener almacenamiento a corto plazo consiste en emplear la memoria de una computadora. Otro en tarjetas especializadas, denominadas *memorias temporales*, que almacenan una o más imágenes a las que puede accederse con rapidez, habitualmente a las velocidades de vídeo



(30 imágenes completas por segundo). Este último método permite la aproximación (*zoom*) prácticamente instantánea de la imagen, así como desplazamientos verticales (*scroll*) y horizontales (*pan*). La capacidad de almacenamiento en una tarjeta de memoria temporal está limitada por el tamaño físico de la tarjeta y por la densidad de almacenamiento de los elementos de memoria utilizados. Hoy en día no es extraño disponer de 32 Mbytes de almacenamiento en una sola tarjeta de memoria temporal.

Para el almacenamiento en línea generalmente se emplean discos magnéticos, siendo los más comunes los discos Winchester de centenares de megabytes. Una tecnología más reciente, denominada almacenamiento magneto-óptico (MO), utiliza un láser y tecnología de materiales especializados para llegar a casi 1 Gbyte de capacidad en un disco óptico de 5 1/4 pulgadas. El factor clave que caracteriza el almacenamiento en línea es el acceso frecuente a los datos. Por ello las cintas magnéticas así como otros medios de acceso secuencial se utilizan muy poco para almacenamiento en línea en aplicaciones de procesamiento de imágenes. Los armarios de discos, o *jukebox*, con capacidad entre 30 y 100 discos ópticos proporcionan una solución eficaz para las aplicaciones del almacenamiento en línea, a gran escala, que necesitan posibilidades de lectura y escritura. Estos armarios de discos ópticos operan por el mismo principio que las muy conocidas cajas de discos de música, en el sentido de que se utiliza un sistema mecánico para insertar (y retirar) los discos en (de) las unidades de disco óptico.

Finalmente el almacenamiento en archivo se caracteriza por necesitar un almacenamiento masivo, pero de acceso poco frecuente. Las cintas magnéticas y los discos ópticos son los medios habituales en las aplicaciones de archivado. Las cintas magnéticas de alta densidad (6.400 bytes por pulgada) pueden almacenar una imagen de 1 Mbyte de información en unos 4 metros de cinta. El principal problema de la cinta magnética es su vida relativamente corta —unos siete años— y la necesidad de un entorno de almacenamiento controlado. La tecnología actual de los discos ópticos, que se pueden escribir una sola vez pero que se pueden leer repetidas veces (WORM, del inglés *write-once-read-many*), permite almacenar del orden de un Gbyte de información en un disco de 5 1/4 pulgadas. A diferencia del almacenamiento MO, existen discos WORM en formatos mayores, con la posibilidad de almacenar cerca de 6 Gbytes en discos de 12 pulgadas y algo más de 10 Gbytes en discos de 14 pulgadas. Tienen el inconveniente de que no se pueden borrar, pero la ventaja de que su vida útil excede de 30 años sin necesidad de requisitos ambientales especiales. Cuando se guardan en una *jukebox*, los discos WORM pueden también servir como dispositivos de almacenamiento en línea en aplicaciones en las que predominen las operaciones de sólo lectura. En la actualidad es posible llegar a un Tbyte de capacidad de almacenamiento WORM en una *jukebox* que ocupe un volumen inferior a 6 metros cúbicos. Esa capacidad se traduce en un millón de imágenes de 8 bits de tamaño  $1.024 \times 1.024$ .

El párrafo anterior trataba de la capacidad de almacenamiento en forma



digital. En aplicaciones en las que no sea necesario recuperar la imagen en forma digital no es raro almacenar la imagen en forma analógica, empleando principalmente película fotográfica o cinta de vídeo.

### 1.4.3. Procesamiento

El tratamiento<sup>1</sup> de imágenes digitales implica procedimientos que normalmente se expresan en forma de algoritmos. Así, con la excepción de la adquisición de las imágenes y su representación, la mayor parte de las funciones de tratamiento de la imagen pueden ser implementadas en software. La única razón de ser del hardware especializado en el procesamiento de imágenes es la necesidad de mayor velocidad en algunas aplicaciones o para evitar algunas limitaciones fundamentales de las computadoras. Por ejemplo, una aplicación importante del tratamiento digital es la microscopía con baja iluminación. Para reducir el ruido de las imágenes se necesita hacer el promedio de numerosas imágenes a la misma velocidad que se van adquiriendo (30 imágenes por segundo en la mayoría de los casos). La arquitectura en bus en todas las computadoras, excepto en unas pocas de altas prestaciones, no puede emplear la velocidad de datos necesaria para realizar esta operación. Así los sistemas actuales de procesamiento de imágenes son una combinación de computadoras, periféricos y hardware especializado en tratamiento de imágenes, de forma que la operación global está controlada por el software que se ejecuta en la computadora principal.

Hasta mediados de la década de los ochenta, numerosos modelos de sistemas de procesamiento de imágenes que se comercializaban en todo el mundo eran más bien dispositivos periféricos específicos que se unían a computadoras principales igualmente específicas. A finales de la década de los ochenta y principios de los noventa el mercado se ha desplazado hacia el hardware de procesamiento de imágenes en forma de placas individuales diseñadas para ser compatibles con las conexiones estándar en la industria y que se pueden instalar dentro de las estaciones de trabajo o en las computadoras personales. Además de rebajar los costes, este desplazamiento del mercado también ha servido de catalizador para muchas nuevas compañías especializadas en el desarrollo de software escrito específicamente para el procesamiento de imágenes.

Aunque todavía se siguen vendiendo grandes sistemas de procesamiento de imágenes para aplicaciones masivas, como el procesamiento de las imágenes de satélites, continúa la tendencia hacia la miniaturización y la adición

---

<sup>1</sup> Como ilustración de la etapa del procesamiento en la Figura 1.7 se ha empleado una pequeña computadora. Sin embargo, para resolver problemas a gran escala de procesamiento de imágenes a menudo se tienen que emplear computadoras mucho mayores e incluso supercomputadoras especializadas.



de hardware de procesamiento de imágenes a las pequeñas computadoras de propósito general. En particular, el principal hardware de imágenes que ha sido incorporado a estos ordenadores consiste en una combinación de digitalizador/memoria para la digitalización de la imagen y su almacenamiento temporal, un procesador aritmético/lógico (ALU) para realizar operaciones aritmético-lógicas a la velocidad de los fotogramas, y una o varias memorias temporales para el acceso rápido a los datos de la imagen durante el procesamiento. En la actualidad es posible obtener comercialmente una cantidad considerable de software de tratamiento de imágenes. Cuando se combina con otro software de aplicación, como hojas de cálculo y gráficos, proporciona un punto de partida excelente para la solución de problemas específicos de procesamiento de imágenes. Los sofisticados sistemas de presentación junto con el software de tratamiento de textos y generación de informes facilitan la presentación de los resultados. A menudo, las soluciones obtenidas con estos sistemas se pueden transportar posteriormente a tarjetas especializadas capaces de un rápido tratamiento de las imágenes, y que son compatibles con el bus empleado durante el desarrollo.

El tratamiento de imágenes se caracteriza por soluciones específicas. Así, técnicas que funcionan bien en un área pueden ser totalmente inadecuadas en otra. Lo que ha conseguido la capacidad actual del potente hardware y del software básico es proporcionar un punto de arranque mucho más alejado de lo que estaba hace menos de una década (y por un fracción de su coste). En realidad, la solución de un problema específico todavía necesita un esfuerzo significativo de investigación y desarrollo. Los temas que abarcan los capítulos siguientes proporcionan las herramientas necesarias para realizar exactamente este tipo de actividad.

#### **1.4.4. Comunicación**

La comunicación en el tratamiento digital de imágenes implica, principalmente, comunicaciones locales entre sistemas de procesamiento de imágenes y comunicaciones remotas entre dos puntos, habitualmente para la transmisión de los datos de las imágenes. El hardware y software para comunicación local que existe en la actualidad es de fácil acceso para la mayoría de las computadoras y la mayor parte de los libros sobre redes de computadoras explican los protocolos de comunicación más usuales.

La comunicación a través de grandes distancias representa un reto mucho más serio, especialmente cuando se trata de comunicar datos de una imagen, en lugar de resultados abstractos. Como ya debe ser evidente para el lector, las imágenes digitales contienen una cantidad importante de datos. Una línea telefónica de audio puede llegar a transmitir un máximo de 9.600 bits/seg; así, para transmitir una imagen de 8 bits y  $512 \times 512$  puntos a esta velocidad se necesitarían unos cinco minutos. Las uniones inalámbricas que emplean estaciones intermedias, como satélites, son mucho más veloces, pero



también cuestan más caras. El resultado es que la transmisión de imágenes completas a largas distancias es un problema nada trivial. En el Capítulo 6 se mostrará que las técnicas de compresión y descompresión de imágenes desempeñan un papel principal en el enfoque de este problema.

### 1.4.5. Presentación

Los monitores de televisión monocromos, y de color, son los principales dispositivos de presentación utilizados en los sistemas modernos de procesamiento de imágenes. Los monitores están gobernados por la salida (o salidas) de una placa de hardware de visualización de imágenes, que puede estar situada en el panel posterior de la computadora principal o bien ser parte del hardware asociado a un procesador de imágenes, como se presentó en la Sección 1.4.3. Las señales de salida del módulo de visualización pueden emplearse como entrada de un módulo de grabación de imágenes que produzca una copia impresa (diapositivas, fotografías o transparencias) de la misma imagen que aparece en la pantalla del monitor. Otros medios de visualización incluyen tubos de rayos catódicos de acceso aleatorio (CRT) y dispositivos de impresión.

En los tubos de rayos catódicos de acceso aleatorio (CRT), el posicionamiento horizontal y vertical del haz de electrones se controla por medio de una computadora que realiza el guiado bidimensional necesario para producir una imagen de salida. En cada punto de deflexión, la intensidad del haz se modula empleando un voltaje proporcional al valor del correspondiente punto de la matriz numérica, variando desde salidas de intensidad igual a cero, en aquellos puntos cuyo valor numérico corresponda al negro, hasta la máxima intensidad, para los puntos blancos. El patrón de luz de intensidad variable se puede registrar empleando una cámara fotográfica enfocada frente al tubo de rayos catódicos.

Los dispositivos de impresión de imágenes son útiles principalmente para el trabajo de procesamiento de baja resolución. Una posibilidad muy simple de generar directamente imágenes en papel con tonos de gris consiste en emplear la capacidad de resaltado de muchas impresoras estándar. El nivel de gris de cada punto impreso se puede controlar a través del número y la densidad de los caracteres sobreimpresos en este punto. Una adecuada selección del conjunto de caracteres permite alcanzar unas matrices de niveles de gris razonablemente buenas con un simple programa y relativamente pocos caracteres. El Apéndice A contiene ejemplos de esta técnica. Otros medios comunes de grabar una imagen directamente sobre papel son las impresoras láser, los dispositivos de impresión térmica y los sistemas de chorro de tinta.