

Apuntes de

Procesamiento Digital de Imágenes

1. Introducción

1.1 Definiciones preliminares

¿Qué entendemos por imagen?

Una imagen puede ser definida matemáticamente como una función bidimensional,

$$f(x,y),$$

donde x y y son coordenadas *espaciales* (en un plano), y f en cualquier par de coordenadas es la *intensidad* o *nivel de gris* de la imagen en esa coordenada.

¿Qué entendemos por imagen digital?

Cuando x,y , y los valores de f son todas cantidades finitas, discretas, decimos que la imagen es una *imagen digital*.

Una imagen digital se compone de un número finito de elementos, cada uno con un lugar y valor específicos. Estos elementos son llamados *pels*, o *pixels*.

¿Qué es el procesamiento digital de imágenes?

En el resto de la sección se intentará contestar esta pregunta estableciendo los diferentes tipos de procesos que engloba el procesamiento digital de imágenes, y sus límites con el análisis de imágenes y la visión computacional.

La vista es nuestro sentido más avanzado, y no es sorprendente que las imágenes jueguen el papel más importante en la percepción humana.

Aunque los seres humanos estemos limitados a la banda visible del espectro electromagnético (EM), las máquinas pueden percibir casi el espectro completo, desde los rayos gamma, a las ondas de radio.

Las máquinas también pueden procesar imágenes generadas por fuentes que los humanos no asociamos con imágenes; como es el caso del ultrasonido, la microscopía de electrones, etc.

Los distintos especialistas no se ponen de acuerdo para decir dónde termina el campo del Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) y dónde empiezan otros campos como el Análisis de Imágenes y la Visión por Computadora (VC).

La tarea de esta última disciplina es utilizar computadoras para emular la visión humana, incluyendo el aprendizaje, hacer inferencias y actuar basándose en entradas visuales. La Visión Computacional es, claramente, un área de la Inteligencia Artificial.

Para propósitos de nuestro curso, consideremos tres tipos de procesos que comienzan en el PDI y terminan en la VC:

- Procesos de Bajo Nivel:

Se caracterizan por que sus entradas son imágenes y sus salidas también. Utilizan operaciones como el *preprocesamiento de imagen* para reducir el ruido, procesos subjetivos como la *mejora del contraste* y los *filtros de enfoque o suavizado*.

- Procesos de Nivel Medio:

Se caracterizan por que sus entradas son generalmente imágenes, pero sus salidas son atributos extraídos de esas imágenes (*contornos, bordes, identidad de objetos individuales*).

Llevar a cabo operaciones como *segmentación* y *clasificación* de objetos individuales.

- Procesos de Alto Nivel:

Implica el obtener algún significado de un *conjunto de objetos reconocidos* – análisis de imágenes – y, finalmente, realizar las funciones *cognitivas* asociadas con la vista.

Como hemos visto en nuestra clasificación de procesos, el traslape del PDI y el Análisis de Imágenes se da en el área de reconocimiento de objetos y regiones individuales en una imagen.

En este curso estableceremos los límites del *Procesamiento Digital de Imágenes* desde los procesos cuyas entradas y salidas son imágenes (los procesos que hemos denominado de bajo nivel) hasta aquellos procesos que extraen atributos de imágenes, incluyendo el reconocimiento de objetos individuales (procesos de nivel medio).

Todos los procesos se llevarán a cabo con la ayuda de una computadora digital.

Ejemplo: Análisis de texto

Para ilustrar lo anterior consideremos el análisis de texto. Los procesos de *adquisición* de la imagen del área que contiene el texto, el *preprocesamiento* de la imagen, la extracción (*segmentación*) de caracteres individuales, la *descripción* de los caracteres de una forma aceptable para el procesamiento computacional, y el *reconocimiento* de cada carácter individual entra en el campo de lo que llamaremos PDI (la *interpretación* de lo que dice el texto, o aún el *reconocimiento* de palabras, quedan fuera de los propósitos de este curso, y ya en el campo del Análisis de Imágenes y la Visión Computacional).

1.2 Antecedentes.

¿Cuáles son los orígenes del procesamiento digital de imágenes?

En la antigüedad y hasta hace no mucho tiempo, la documentación se llevaba a cabo por descripción verbal y dibujos manuales. A finales del siglo XIX la fotografía proporciona una forma de documentación *objetiva* hasta entonces no disponible. Excepto en algunos campos como la Astronomía, la Fotogrametría y la Física de partículas, las fotografías se siguieron utilizando solamente para documentar o describir cualitativamente algún fenómeno.

En nuestra definición de PDI aclaramos que éste conlleva el uso de una computadora digital, por lo tanto los verdaderos orígenes de uno y la otra están íntimamente relacionados. Sin embargo hay antecedentes que vale la pena comentar.

Una de las primeras aplicaciones de las imágenes digitales se dio en la industria del periódico cuando se enviaron fotografías a través de cable submarino entre Londres y Nueva York, a principios de la década de los veinte. El sistema Bartlane tomaba cerca de tres horas y constaba de equipo de impresión especializado que codificaba las fotografías para su envío por cable y las reconstruía del otro lado.



Fig. 1.1 Fotografía digital de 1921 obtenida con una impresora telegráfica con tipos especiales.

Esta técnica se abandonó rápidamente, favoreciendo otro tipo de reproducción fotográfica basada en cintas que se perforaban en la terminal telegráfica receptora (fig 1.2)

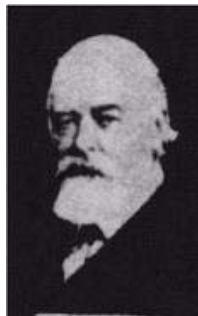


Fig 1.2 Fotografía digital de 1922 obtenida a partir de una cinta perforada después de que las señales cruzaron el atlántico dos veces. Se pueden apreciar errores.

Como ya mencionamos, aunque estas imágenes entran en nuestra definición de imagen digital, no podemos decir que son resultados del Procesamiento Digital de Imágenes pues no se usaron computadoras para crearlas. De hecho, las imágenes digitales necesitan tanto espacio de almacenamiento y capacidad de procesamiento que el avance del PDI ha dependido del desarrollo de las Computadoras digitales y tecnologías de apoyo que incluyen almacenamiento de datos, despliegue y transmisión.

Las primeras computadoras suficientemente potentes para desarrollar tareas de PDI significativas aparecieron en los comienzos de los sesentas, junto con el programa espacial estadounidense. El laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena California inició los trabajos en 1964 cuando un equipo procesó varias fotos de la luna transmitidas por el Ranger 7, para corregir varios tipos de distorsión que producía la cámara de a bordo (fig 1.3)

Estas investigaciones servirían de base para desarrollos posteriores en subsecuentes misiones como Surveyor, Mariner y Apollo.

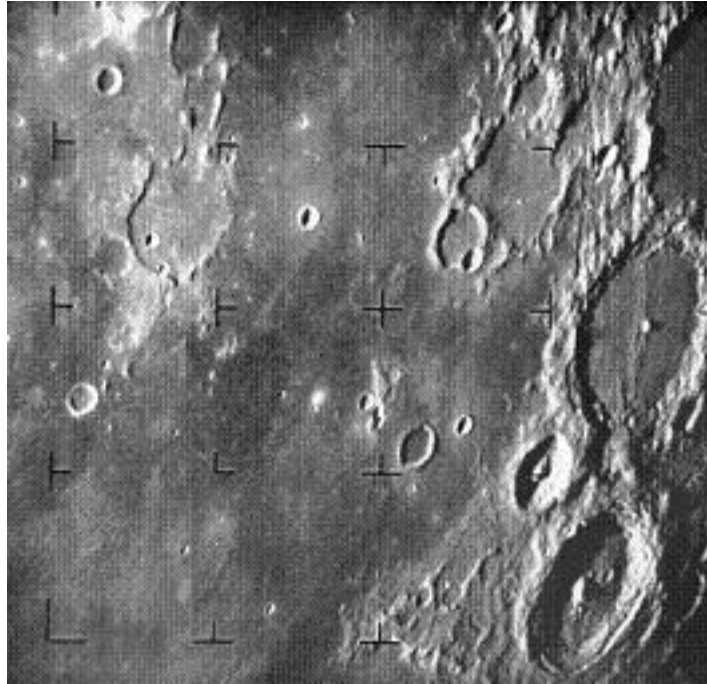


Fig.1.3 La primera fotografía de la luna de una nave espacial estadounidense (31 de julio de 1964 a las 9:09 am). Las marcas se usan para corregir la curvatura.

Paralelamente, en los años 60 y 70, se desarrollaron técnicas para imágenes médicas, observaciones remotas de la tierra y astronomía. La invención en los años 70s de la tomografía axial computarizada¹ (CAT por sus siglas en inglés), fue uno de los más importantes eventos en la aplicación de PDI a diagnósticos médicos.

A partir de los años sesenta y con el desarrollo de las computadoras, el PDI ha avanzado a pasos impresionantes y sus algoritmos se empezaron a utilizar en un amplio rango de aplicaciones (Geólogos que estudian la contaminación con imágenes satelitales o aéreas, arqueólogos que restauran viejas fotografías de antiguos artefactos destruidos con el tiempo, aplicaciones en astronomía, biología, defensa, la industria, reconocimiento de caracteres, control de calidad, etc). El abaratamiento de equipo de alta tecnología y el advenimiento de la red Internet han creado oportunidades jamás vistas para el crecimiento de la PDI. En estos días, esta tecnología está disponible para cualquier ingeniero o científico y se ha convertido en una herramienta estándar en virtualmente todas las ciencias.

En la siguiente sección se ilustrarán algunas de las áreas de aplicación del Procesamiento Digital de Imágenes.

¹ La CAT consta de un anillo que rodea al paciente mientras una fuente de rayos X concéntrica rota a su alrededor. Los rayos X pasan a través del paciente y se recolectan en el lado opuesto del anillo. El paciente va avanzando y se obtienen “rebanadas” a partir de las cuales se puede formar una imagen 3D del interior del paciente.

1.3 Ejemplos de campos de aplicación del PDI

Hoy en día casi no hay áreas de enfoque técnico que no hayan sido impactadas de alguna manera por el procesamiento digital de imágenes.

El PDI permite investigar fenómenos complejos, imposibles de acceder con técnicas de medición convencionales.

Las áreas son tan abundantes y variadas que nos forzan a utilizar un criterio de clasificación para dar algunos ejemplos.

En este caso nuestro criterio de clasificación será por la fuente utilizada para obtener la imagen. La principal fuente de energía utilizada con estos fines es el espectro electromagnético (otras fuentes son la acústica, la ultrasónica, y la electrónica). Las imágenes basadas en la radiación del espectro EM son las más familiares, especialmente las imágenes de rayos X y las bandas visuales del espectro.

Las ondas electromagnéticas pueden ser conceptualizadas como ondas sinusoidales de longitudes de onda variadas, o como una corriente de partículas sin masas viajando en un patrón de ondas y moviéndose a la velocidad de la luz. Su unidad es el fotón.

Agrupando las bandas espectrales de acuerdo a su energía por fotón, obtenemos el espectro de la figura, desde los rayos gamma (con mayor energía) hasta las ondas de radio.

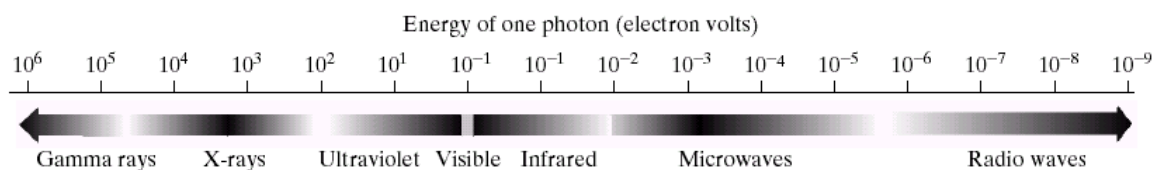


FIGURE 1.5 The electromagnetic spectrum arranged according to energy per photon.

Fig 1.4 Espectro EM en energía por fotón.

1.3.1 Rayos gamma

Sus aplicaciones más importantes: la medicina nuclear y las observaciones astronómicas.

Medicina nuclear

Se inyecta al paciente un isótopo radioactivo que emite rayos gamma cada vez más débiles, estos se detectan y se forma la imagen.

Otro caso es la Tomografía de Emisión de Positrones PET, similar a la tomografía de rayos X, pero en esta se inyecta al paciente un isótopo radioactivo que emite positrones. Los positrones chocan con los electrones del paciente, se destruyen ambos, y se producen 2 rayos gamma que se detectan para formar la imagen.

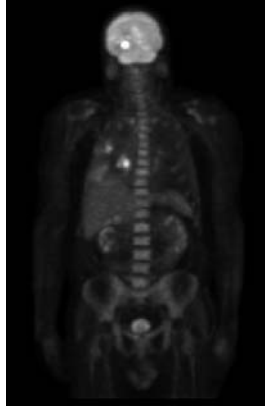


Fig 1.5 Tomografía por emisión de positrones (PET)

Astronomía

Se detecta la radiación natural de rayos gamma de los astros.



Fig 1.6 Imagen a partir de rayos gamma de Cygnus Loop

1.3.2 Rayos X

Los rayos X no sólo se usan en medicina, sino también en gran manera en la industria y otras áreas, como la astronomía.

Angiografía

Es una aplicación de la radiografía de mejora de contraste. Se utiliza para obtener angiogramas, imágenes de venas y arterias. Un cateter se inserta en una de estas y se guía hasta el área a estudiar. Una vez ahí, se inyecta por medio de éste un medio que mejora el contraste y permite al radiólogo ver irregularidades o bloqueos.



fig 1.7 Angiograma de la aorta

CAT, Tomografía axial computarizada



fig 1.8 Tomografía de la cabeza

Aplicaciones en la industria

Generalmente en control de calidad (tamaño, posición correcta, piezas dañadas), se utilizan rayos X de alta energía.

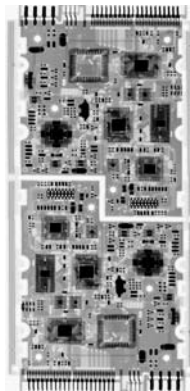


fig 1.9 Circuito integrado (rayos X)

1.3.3 Ultravioleta

Las aplicaciones incluyen litografía, inspección industrial, microscopía, lasers, imágenes biológicas y observaciones astronómicas.

Microscopía de fluorescencia

La fluorescencia se observó en el siglo diecinueve, al dirigir luz ultravioleta a un mineral con fluor se observó que este brillaba. La luz ultravioleta no es visible, pero cuando un fotón ultravioleta choca con un electrón de un átomo de material fluorescente, este electrón se eleva a un nivel más alto de energía. Después éste regresa a un nivel bajo y emite luz en forma de un fotón de baja energía en la región de luz visible (rojo).

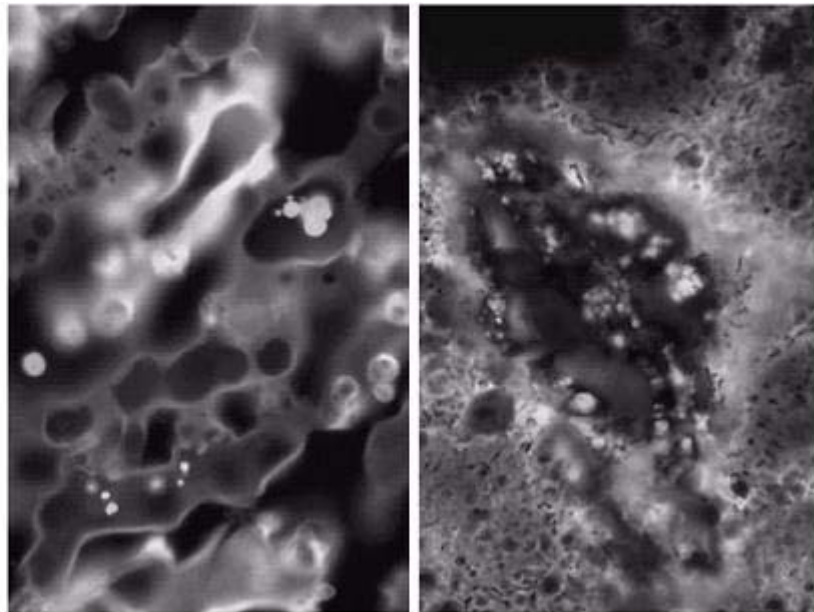
La microscopía de fluorescencia utiliza este principio, dirigiendo una luz de excitación a un objeto preparado y separando la radiación ultravioleta producida (débil) de la producida por la luz de excitación (brillante).

Fig 1.8 a b

Ejemplos de imágenes ultravioleta.

a) Maíz sano.

b) Maíz enfermo (smut)



1.3.4 Visible e infrarroja

Estas son, por mucho, las aplicaciones más numerosas. La banda infrarroja se utiliza usualmente en conjunto con la imagen visual.

Mencionamos algunos ejemplos de microscopía, astronomía, detección remota, industria, y policía.

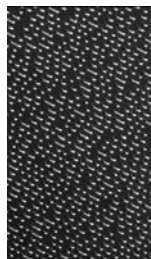


Fig 1.11 Superficie de un CD de audio al microscopio

Detección remota

Las diferentes *bandas* de satélite detectan diferentes detalles.

Banda	Nombre	Longitud de onda	Usos y características
1	Azul visible	0.45 – 0.52	Penetración máxima del agua
2	Verde visible	0.52 – 0.60	Bueno para medir la salud de las plantas
3	Rojo visible	0.63 – 0.69	Discriminación de vegetación
4	Infrarrojo bajo	0.76 – 0.90	Mapeo de costas y biomasa
5	Infrarrojo medio	1.55 – 1.75	Contenido de humedad en el suelo y vegetación
6	Infrarrojo termal	10.4 – 12.5	Humedad del suelo y mapeo termal
7	Infrarrojo alto	2.08 – 2.35	Mapeo mineral

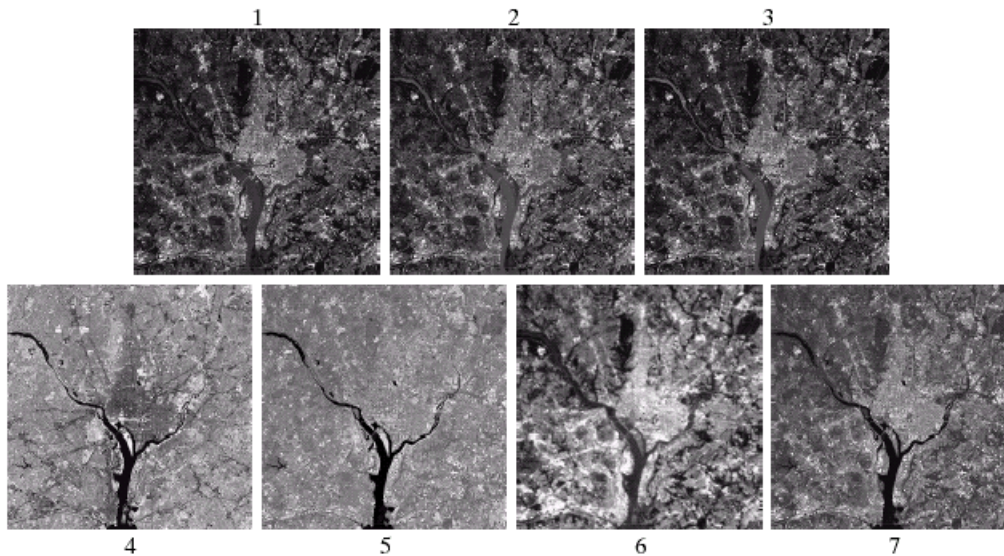


FIGURE 1.10 LANDSAT satellite images of the Washington, D.C. area. The numbers refer to the thematic bands in Table 1.1. (Images courtesy of NASA.)

Fig 1.12 Imágenes de las 7 bandas del satélite LANDSAT (detalladas arriba), de la ciudad de Washington

Estas imágenes pueden ser usadas para ver, en ciudades, movimientos o crecimiento de población, contaminación, u otros factores que dañan al ambiente. Otras aplicaciones incluyen observación y predicción del clima, o, como en el caso de la base de datos de fotografías *Nighttime lights of the world*, un inventario de asentamientos humanos mundiales (infrarrojo).

Control de calidad

Una aplicación muy utilizada de la luz visible e infrarroja es en el control de calidad, donde se utiliza para revisar productos de orden variado (niveles correctos en botellas, circuitos integrados con todos los componentes, errores de fabricación o material defectuoso).

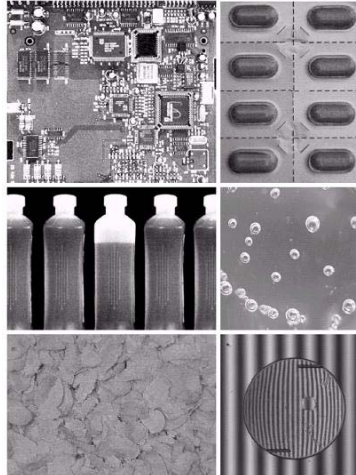


Fig 1.13 Control de calidad en circuito integrado, empaque de píldoras, nivel de líquidos, burbujas en plástico transparente, cereal, y fallas en una lente intraocular.

1.3.5 Microondas

Su aplicación principal es el radar. El radar puede obtener datos de virtualmente cualquier región a cualquier hora, sin importar condiciones de clima o de luz ambiental (puede penetrar nubes, vegetación, hielo, arena).

Un radar utiliza su propia "iluminación" (pulsos de microondas) para obtener una imagen obtenida a partir de la energía reflejada.

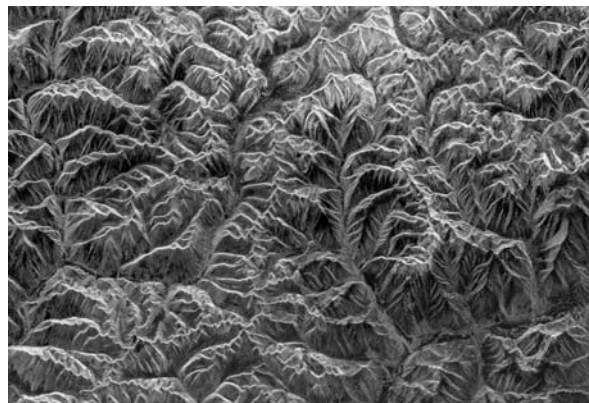


Fig 1.14 Imagen de radar del tibet.

1.3.6 Ondas de radio

Mayoritariamente se usa en medicina y astronomía.

Medicina

Resonancia magnética (MRI). Se introduce al paciente en un imán de gran poder y se pasan ondas de radio por su cuerpo en pulsos cortos. Cada pulso causa un pulso resultante de ondas de radio desde los tejidos del paciente. La computadora determina el lugar y fuerza de estos pulsos, y produce una imagen bidimensional de una sección del cuerpo del paciente.

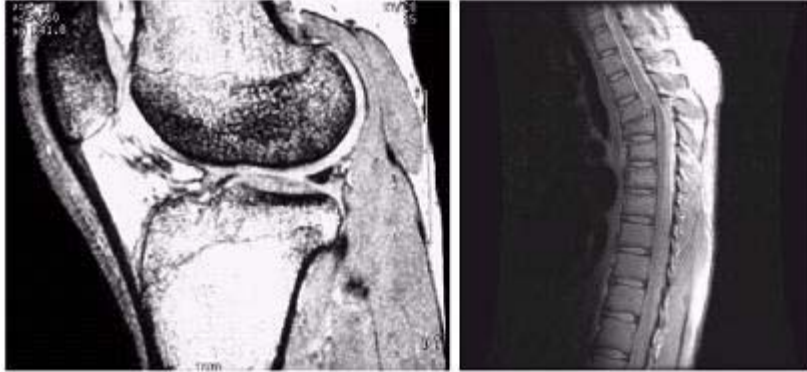


fig 1.15 Imágenes MRI de una rodilla y una espina.

1.3.7 Aplicaciones de otras fuentes de energía

Sonido

Se aplica en exploración geológica (petróleo y minerales), la industria, y medicina.

En la primera se utiliza sonido en la parte baja del espectro (cientos de Hertz), y las otras áreas utilizan ultrasonido.

Por ejemplo, en geología se utiliza un gran camión para presionar un aplaca en el suelo, y se hace vibrar el camión a una frecuencia de cerca de 100 Hz. Las ondas que regresan se analizan.

Un método similar se utiliza para adquisición submarina, al disparar 2 pistolas de aire y recuperar las ondas de regreso para producir un mapa 3D del fondo del océano.

Microscopía de electrones

Un microscopio de transmisión de electrones (TEM) trabaja como un proyector de acetatos. El proyector transmite un rayo de electrones a través del espécimen y se proyecta en una pantalla de fósforo.

Un microscopio de escaneo de electrones escanea el rayo de electrones y registra la interacción del rayo y la muestra en cada lugar.

1.4 Pasos fundamentales del procesamiento digital de imágenes

Dividiremos el material de los siguientes capítulos en métodos en que la entrada y salida es una imagen, y métodos en los que la entrada es una imagen y la salida son datos. Las partes fundamentales del procesamiento digital de imágenes son las siguientes. Como lo indica la figura, después de adquirir la imagen, en un procesamiento no siempre se siguen todos los pasos.

1. *Adquisición de imágenes*

Es el proceso de obtener la imagen. Puede incluir decisiones como qué *sistema de iluminación* es más conveniente, el mejor rango de longitud de onda para la aplicación, etc. Generalmente incluye pequeños pasos de preprocesamiento, como el corregir características no lineales, distorsiones geométricas, escalar.

2. *Mejora de la imagen*

La idea de este paso es obtener detalles que no se veían, o simplemente subrayar ciertas características de interés. Que se “vea mejor”. Por supuesto, a nivel subjetivo.

3. *Restauración de la imagen.*

También mejora la apariencia de la imagen, a diferencia de la mejora de la imagen, subjetiva, la restauración es objetiva, en el sentido en que las técnicas de restauración tienden a ser modelos probabilísticos o matemáticos de degradación de la imagen (¿Cómo era esta imagen antes de ser dañada?)

4. *Procesamiento del color.*

Procesamientos especiales para el color.

5. *Compresión*

Reduce el almacenamiento requerido para guardar una imagen, o el ancho de banda para transmitirla.

6. *Procesamiento morfológico*

Herramientas para extraer componentes de la imagen útiles para la representación y descripción de formas.

7. *Segmentación*

Divide una imagen en sus partes constituyentes.

8. *Representación y descripción.*

Se toman decisiones tales como si la forma obtenida debe ser tratada como un frontera o una región, y extrae atributos que resultan en información cuantitativa de interés.

* *Base de conocimiento.* Nos sirve de almacenamiento de información: Ya sean los datos de las imágenes en cada paso, o heurísticas que nos ayudarán a obtener mejores imágenes en subsecuentes procesamientos.

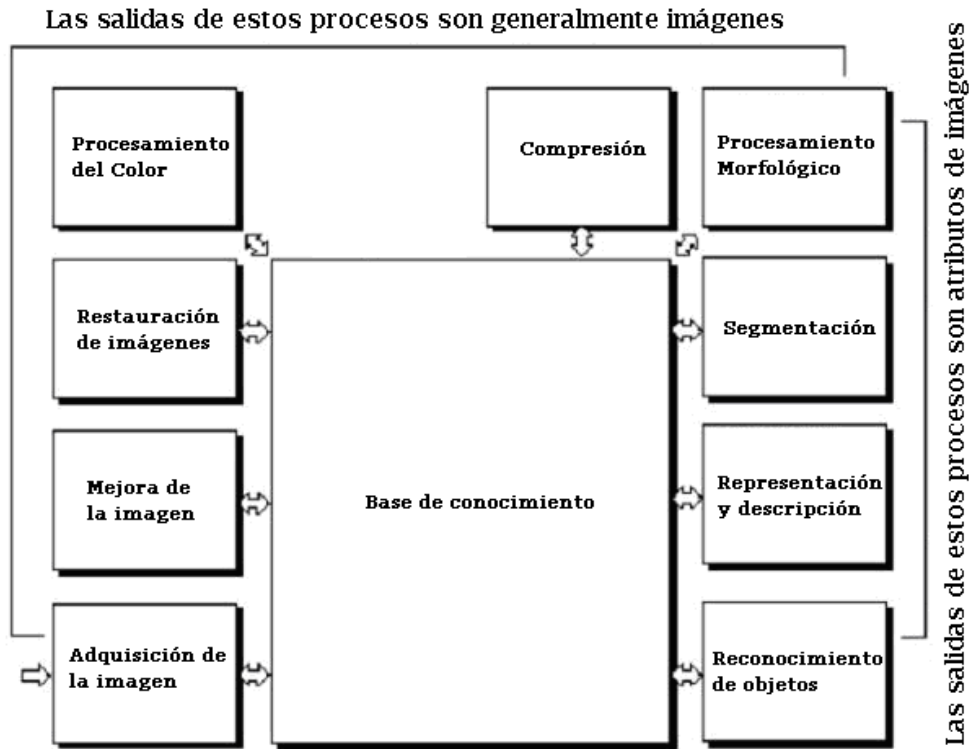


Fig 1.16 Pasos del procesamiento digital de imágenes

1.5 Componentes de un sistema de procesamiento de imágenes de propósito general

---- FALTA JAHNE

1. Sensor

Es un aparato físico sensible a la energía radiada por el objeto.

2. Hardware de procesamiento de imágenes especializado

Usualmente consta de un digitalizador que convierte la salida del sensor a formato digital, y de hardware que realiza otras operaciones, como una ALU, que procesa operaciones en paralelo de imágenes completas. Su característica más distintiva es la velocidad (realiza operaciones que requieren salidas de datos muy rápidas).

3. Computadora

En un sistema de propósito general puede ser desde una PC hasta una supercomputadora.

4. Software

Módulos especializados que llevan a cabo tareas específicas.

5. Almacenamiento en masa

Obligatorio en aplicaciones de procesamiento de imágenes. El almacenamiento se divide en tres categorías:

- a corto plazo, utilizado durante el procesamiento (ej. Memoria de la computadora, o memorias especiales "frame buffers", éstas últimas se utilizan en zooms digitales)
- en línea, para carga relativamente rápida (discos magnéticos u ópticos)

- de archivo, de acceso poco frecuente (cintas magnéticas y discos ópticos).

6. Dispositivos de despliegue de imágenes

Por ejemplo, monitores a color (de preferencia planos, para evitar distorsiones), o dispositivos estéreo tales como lentes para estereo visión.

7. Dispositivos de copia dura (hardcopy)

Impresoras láser o tinta, cámaras de película, dispositivos sensibles al calor, unidades digitales como cd-rom.

8. Red

Casi una función por defecto en cualquier sistema computacional moderno, lo más importante es el ancho de banda.

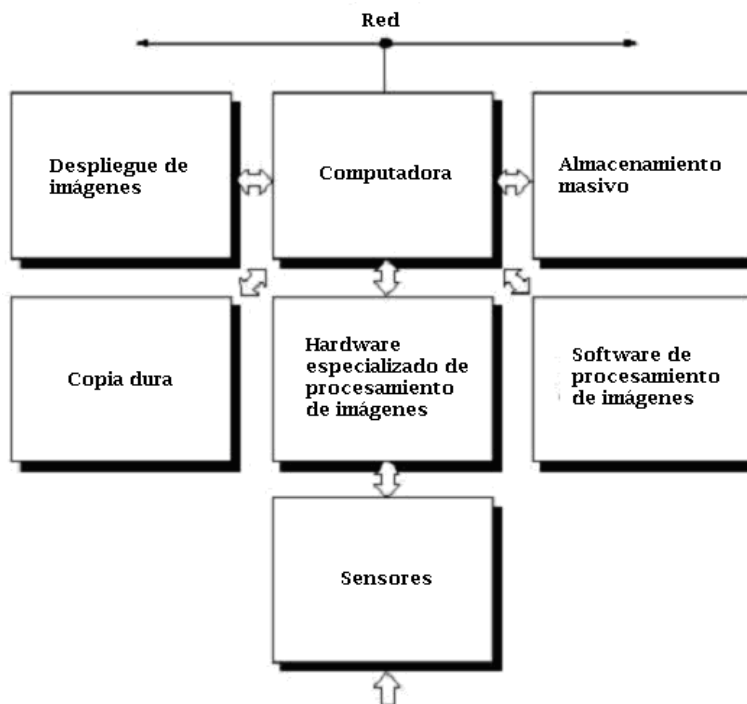


Fig 1.17 Componentes de un sistema de PDI de propósito general