

Carrera de Ingeniería en Ciencias de la Computación

Visión por Computador

- Fundamentos de Imágenes Digitales -

Vladimir Robles Bykbaev

vrobles@ups.edu.ec

Universidad Politécnica Salesiana

Grupo de Investigación en Inteligencia Artificial y Tecnologías de Asistencia
(GI-IATA)

2025

Cuenca – Ecuador

Esquema Capitular:

1. Introducción al Procesamiento Digital de Imágenes
2. Fundamentos de las Imágenes Digitales
3. Mejoramiento de Imágenes en el Dominio Espacial
4. Mejoramiento de Imágenes en el Dominio de la Frecuencia
5. Restauración de Imágenes
6. Procesamiento Morfológico de Imágenes
7. Segmentación
8. Aplicaciones Prácticas

Esquema Capitular:

1. Introducción al Procesamiento Digital de Imágenes
2. **Fundamentos de las Imágenes Digitales**
3. Mejoramiento de Imágenes en el Dominio Espacial
4. Mejoramiento de Imágenes en el Dominio de la Frecuencia
5. Restauración de Imágenes
6. Procesamiento Morfológico de Imágenes
7. Segmentación
8. Aplicaciones Prácticas

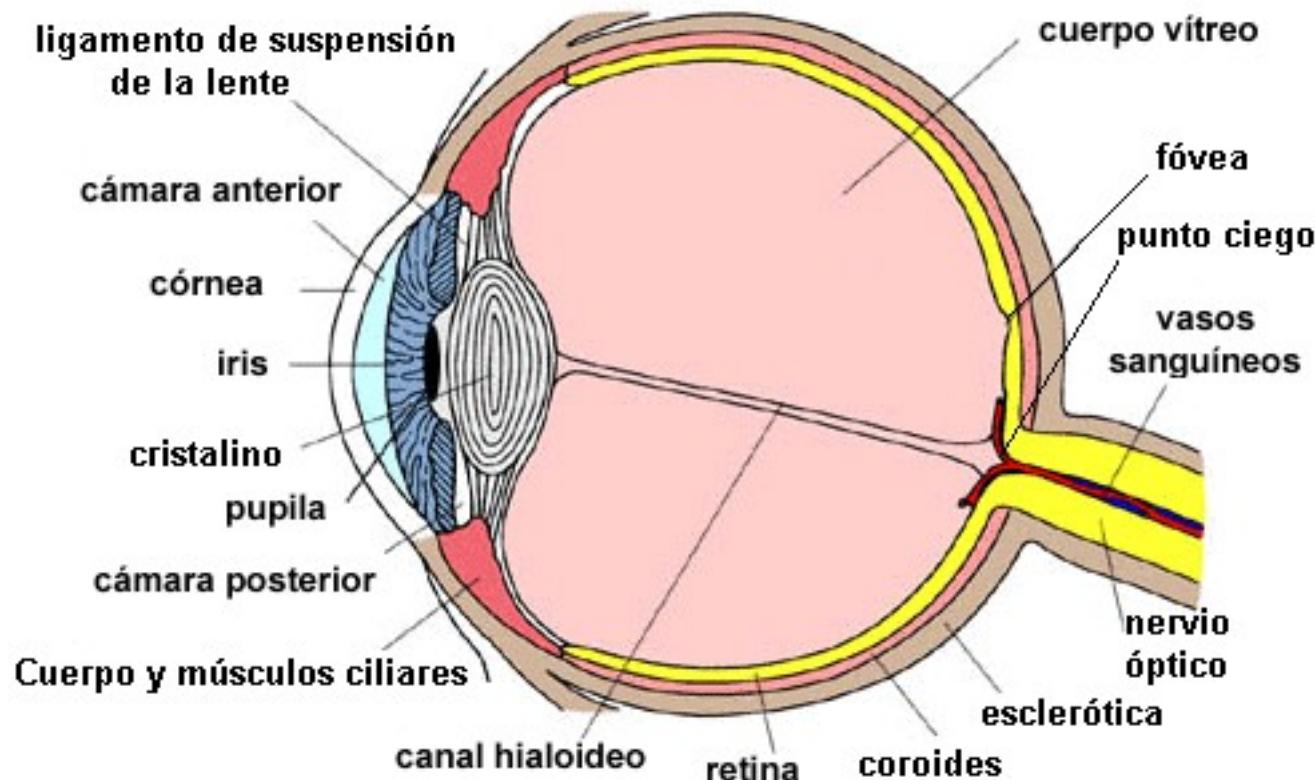
2. Fundamentos de las imágenes digitales

- **Sistema de Visión Humano**
 - A pesar de que el PDI se fundamenta en formulaciones matemáticas y probabilísticas, la intuición y análisis que realiza el ser humano es un aspecto fundamental.
 - Por ello, es fundamental comprender el sistema de percepción visual humano de manera rudimentaria, lo que nos permitirá comprender cómo un sistema digital es capaz de adaptarse a los cambios de iluminación frente al sistema humano.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano
 - La visión es el sentido que más destaca en el ser humano.
 - Algunos estudios indican que el 75% de la información sensorial procesada por el cerebro proviene de este sentido.
 - Posee dos millones de fibras frente a las treinta mil que tiene el oído.
 - El ojo es casi una esfera, con un diámetro aproximado de 20mm, encerrado por tres membranas: córnea y esclerótica (externas), la coroides y la retina.
 - La córnea es dura y transparente y cubre la superficie anterior del ojo, mientras la membrana que continua (esclerótica) es opaca y cubre el resto del globo óptico.

1. Introducción al Procesamiento Digital de Imágenes



Estructura del Ojo Humano [1]

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano
 - La coroides está directamente debajo de la esclerótica y contiene una red de vasos sanguíneos que constituyen la mayor fuente de nutrientes del ojo.
 - El sensor está formado por la retina, ubicada en la parte posterior del globo ocular.
 - La retina se divide en dos partes: fóvea y mácula.
 - La fóvea es la zona central con mayor número de elementos sensibles a la luz.
 - La fóvea provee una zona de la imagen con mayor resolución, tiene un 1.5mm de diámetro.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano
 - La mácula contiene a la fóvea, es de mayor área y menor resolución.
 - Estas dos partes se distinguen por las longitudes de onda a las que presentan mayor actividad.
 - Los elementos sensores son de dos tipos: conos y bastones.
 - Los conos se ubican en su mayoría en la fóvea, requieren de luz brillante para activarse.
 - Existen entre 6 y 7 millones de conos. Cada uno de ellos se conecta con varias neuronas.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano
 - Los bastones se ubican en su mayoría en la mácula. No distinguen colores y presentan respuesta con poca luz.
 - Si se trabajase sólo con bastones, se tendría una imagen en blanco y negro.
 - Existen entre 75 y 105 millones de bastones, varios se conectan a un misma neurona, a fin de aumentar la información enviada al cerebro.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano
 - La retina transmite la señal eléctrica correspondiente a la imagen. Para ello los rayos luminosos deben concentrarse en ella.
 - La función de lente la realizan varios elementos:
 - Córnea: el más exterior y funciona como lente fija
 - Iris o pupila: controla la cantidad de luz que pasa a la retina
 - Despues del iris está el cristalino (lente), que puede cambiar de forma para enfocar objetos a distintas distancias
 - La señal luminosa se transforma en eléctrica para ser procesada por el cerebro.

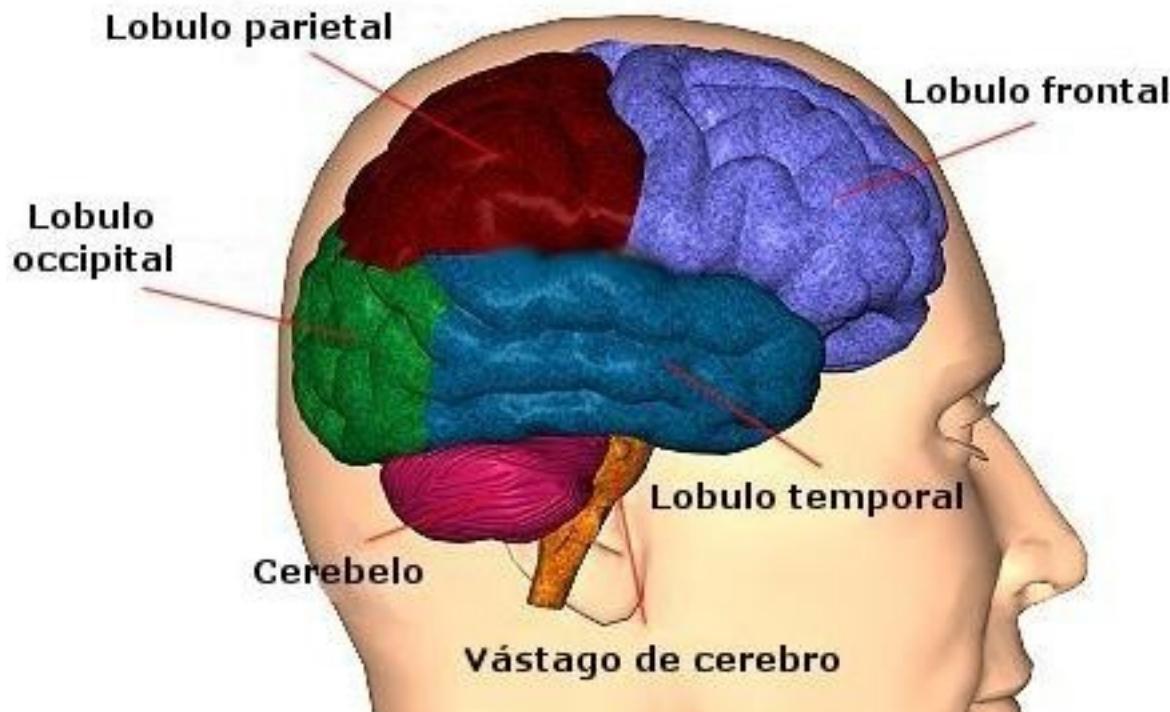
2. Fundamentos de las imágenes digitales

- **Sistema de Visión Humano**

- La imagen es procesada en el córtex visual primario (ubicado en el lóbulo occipital) a través de dos grupos de nervios que permiten detectar mayor o menor movimiento.
- El córtex visual primario tiene 24 cm^2 y $1,5 * 10^8$ neuronas.
- El cerebro extrae las características de las imágenes. Existen estas zonas para ello:
 - Parietales: Responden mejor a modificaciones espaciales de los objetos (donde está la imagen, qué tamaño tiene, si tiene diferente orientación y qué zonas son estáticas o tienen movimiento).
 - Lóbulo inferior temporal: Responde mejor a los colores, texturas, formas y posee una zona para reconocer rostros.
 - Lóbulo occipital: Separa objetos del fondo (por agrupación de regiones o por zonas de fuerte discontinuidad).

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano



Partes del Cerebro. Se distingue el Lóbulo Occipital (marcado con color verde) [2]

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano
 - Con la fusión de esta información podemos reconocer e identificar objetos a pesar de que:
 - Los objetos estén a diferentes distancias.
 - Los objetos estén a la misma distancia pero tengan diferente tamaño.
 - Los objetos estén rotados.
 - Se encuentren en distinta posición de la imagen.
 - Los objetos estén ocultos parcialmente.
 - Las imágenes estén parcialmente degradadas.
 - Somos capaces de generalizar y particularizar al mismo tiempo.

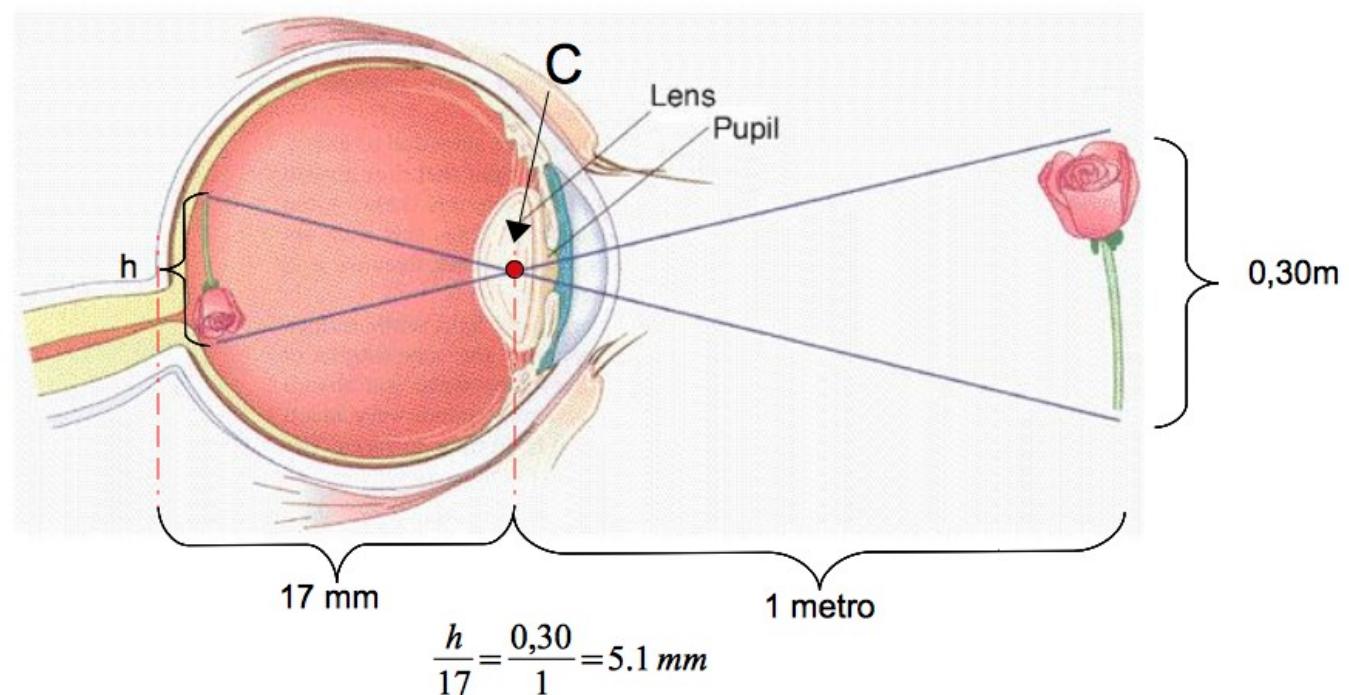
2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano
 - Formación de la imagen en el ojo.
 - La distancia entre el lente y la región de la imagen (retina) es fija, por lo que la longitud del eje focal debe generar un foco adecuado, tarea que la realiza a través de la variación de los lentes.
 - Los músculos ciliares realizan esta tarea, contrayendo o ampliando el lente, para objetos distantes o cercanos, respectivamente.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Sistema de Visión Humano

- Formación de la imagen en el ojo (donde h es el tamaño del objeto en la imagen de la retina y C es el centro de los lentes):



2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Adquisición de imágenes
 - Es importante tomar en consideración que la adquisición de las imágenes es una de las etapas más importantes del PDI.
 - Un buen sistema de iluminación simplifica el análisis e interpretación de la escena.
 - Cuando una luz incide en un objeto pueden darse las siguientes situaciones:
 - Que refleje la luz (espejo)
 - Que absorba la luz (cuerpo negro)
 - Que se transmita a través de él (cristal)

2. Fundamentos de las imágenes digitales

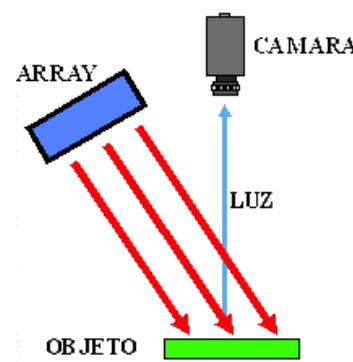
- Adquisición de imágenes
 - Los objetos se caracterizan por las siguientes propiedades: reflexivas (cómo se refleja la luz), absorbentes (si el material es selectivo o no al espectro) y transmitivas (cómo pasa la luz por el material).
 - La iluminación puede ser de alguno de estos tipos:
 - Direccional: Se aplica una iluminación orientada al objeto. Se aplica en:
 - Localización y reconocimiento de piezas
 - Inspección de la superficie de piezas

2. Fundamentos de las imágenes digitales

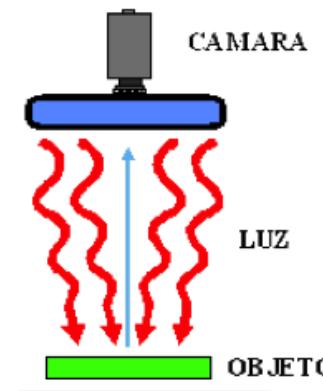
- Adquisición de imágenes

- Difusa: Se intenta iluminar al objeto desde todas las direcciones. Se usa para:

- Se toman imágenes a través de microscopios.
- Si los objetos tienen superficies suaves o regulares
- Se necesitan imágenes desde diversos puntos de vista



Illuminación
Dirccional Lateral [3]



Illuminación Difusa
Dirccional [3]

2. Fundamentos de las imágenes digitales

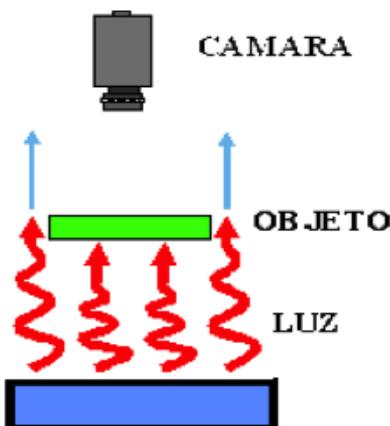
- Adquisición de imágenes

- Contraluz: Produce imágenes binarias, se ilumina al objeto por detrás. Se aplica en:

- Localización y reconocimiento de piezas
- Análisis dimensional.
- Presencia de taladros internos.

Estructurada: Se usa para:

- Proyección de puntos, franjas o rejillas sobre la superficie de trabajo.



Iluminación
Contraluz [3]

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Adquisición de imágenes
 - A más de la iluminación empleada, es necesario trabajar con sensores que permitan digitalizar la escena a capturar.
 - Para ello existen diversos tipos de sensores, sin embargo, nos centramos en los 3 más importantes: simple, lineal y matricial.
 - Con ello, las imágenes que se capturan se generan por la combinación de una fuente de iluminación y la reflexión o absorción de la energía por parte de los elementos de la escena.
 - Los sensores transforman esa energía en niveles de voltaje, valores que serán digitalizados luego.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Adquisición de imágenes

- Sensor simple . – Uno de los más comunes es el fotodiodo, que está construido de materiales de silicón, que generan una respuesta proporcional (voltaje) a la luz. Para generar imágenes 2D con este sensor, se requiere realizar movimientos a lo largo de los ejes “x” e “y”.
- Sensor lineal . – Emplean una línea de sensores para realizar un “barrido”. Este tipo de adquisición se usa en escáneres. Los sensores montados en anillos, emiten rayos X para generar la fuente de iluminación, que es capturada al otro lado. Con este principio funciona la TAC.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

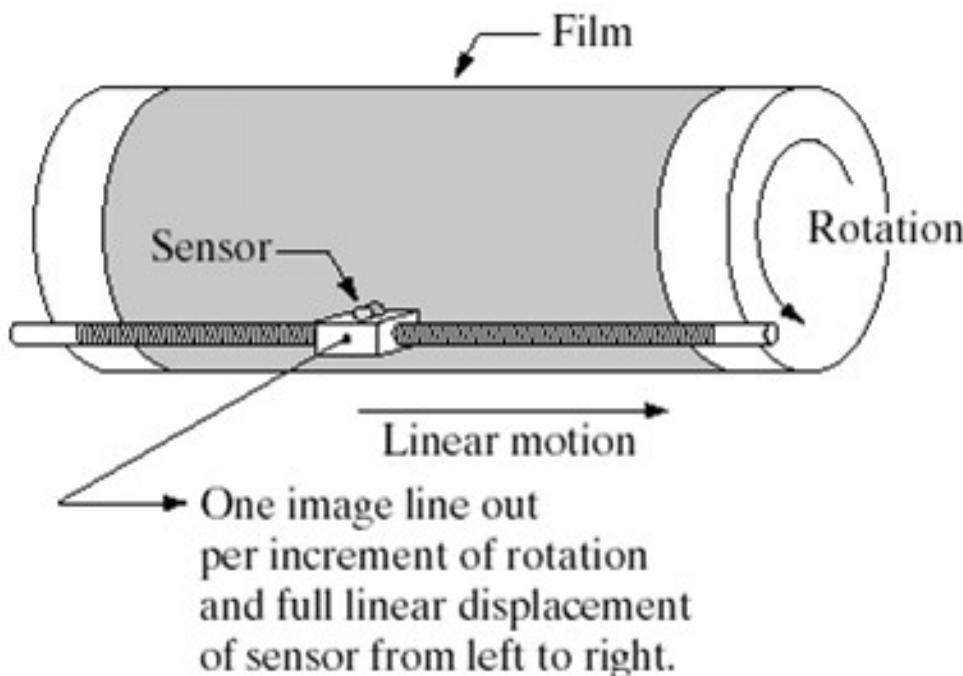
- Adquisición de imágenes

- Sensor matricial . – Usa un conjunto de sensores organizados en forma de matriz. Este tipo de configuración es el más usado en cámaras (CCD: Charged-Coupled Device).

- Los sensores CCD generalmente se organizan en arreglos de 4000 x 4000 y la respuesta de cada sensor es proporcional a la integral de la energía proyectada sobre la superficie del mismo.
 - Debido a su configuración 2D, tiene la ventaja de que se puede capturar la imagen completa con un solo proceso de censado.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

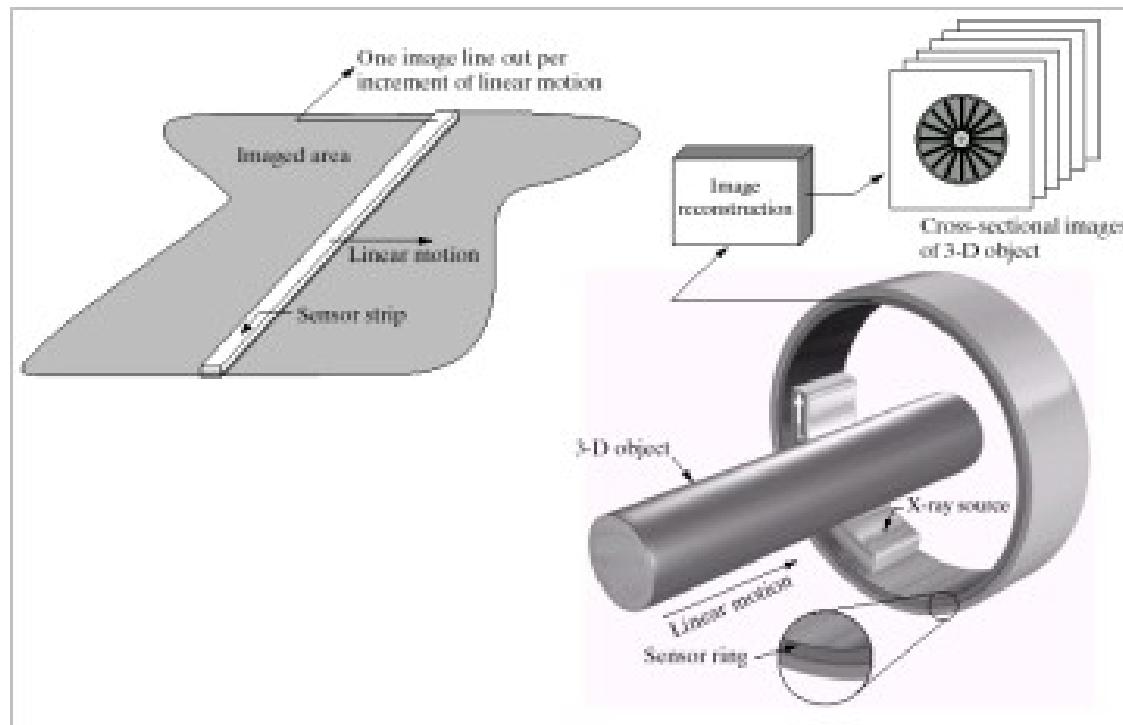
- Adquisición de imágenes



Sensor simple para adquirir imágenes [4]

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Adquisición de imágenes



Sensor lineal para adquirir imágenes (izquierda) y
Sensor circular para adquirir imágenes 3D (derecha) [4]

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Representación de imágenes

- Como se explicó anteriormente, las imágenes se representan como una función bi-dimensional de la forma $f(x,y)$. La amplitud de f en las coordenadas espaciales (x,y) , debe ser no cero y no infinita.
- La función $f(x,y)$ se caracteriza por la cantidad de iluminación empleada en la escena (iluminación) y por la cantidad de iluminación reflejada por la escena (reflectancia):

$$f(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y)$$

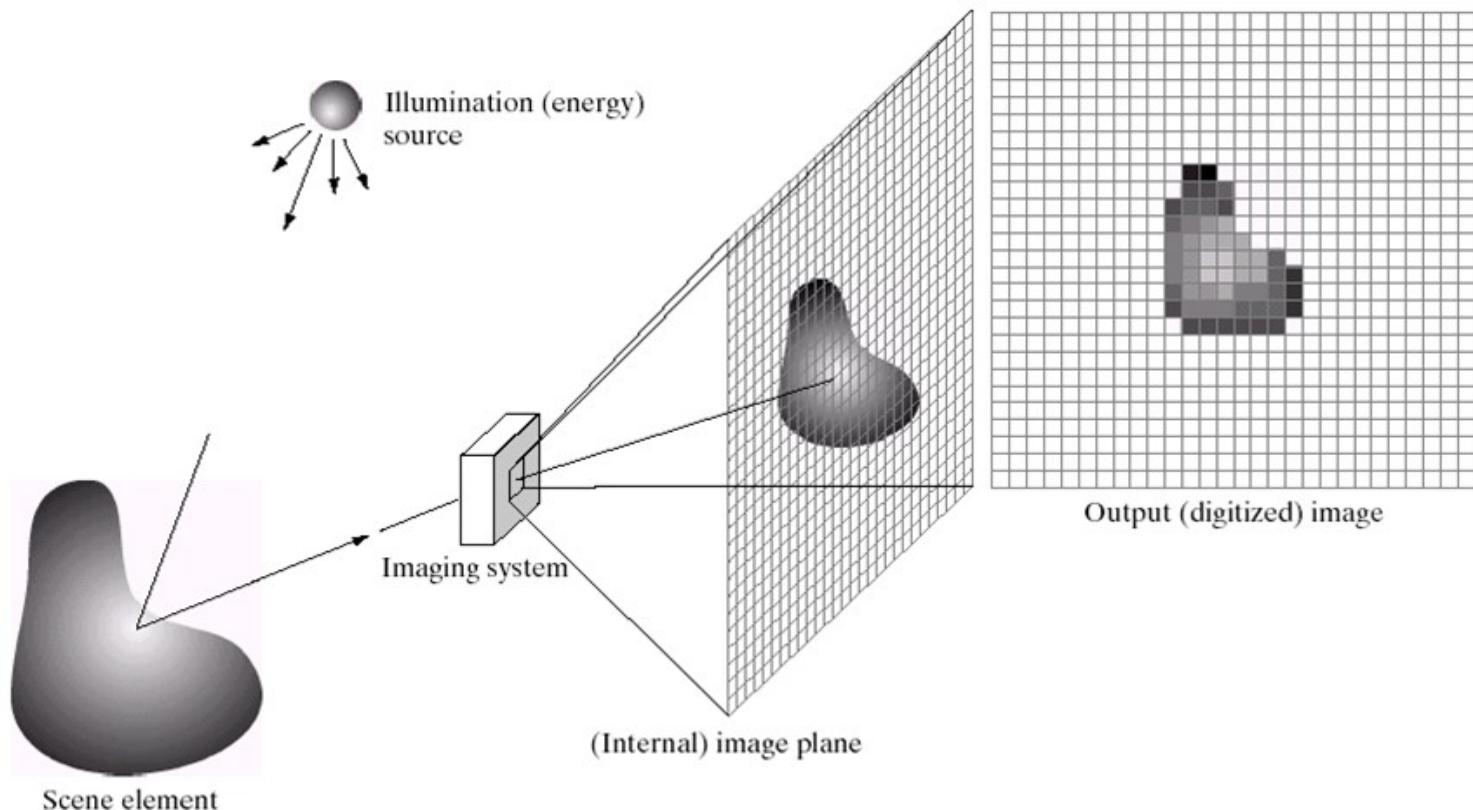
Donde:

- La ecuación nos indica que la reflectancia está restringida a 0 (total absorción) y 1 (total reflectancia).

$$0 < i(x,y) < \infty \quad 0 < r(x,y) < 1$$

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Representación de imágenes



Ejemplo de Adquisición Digital de Imágenes [4]

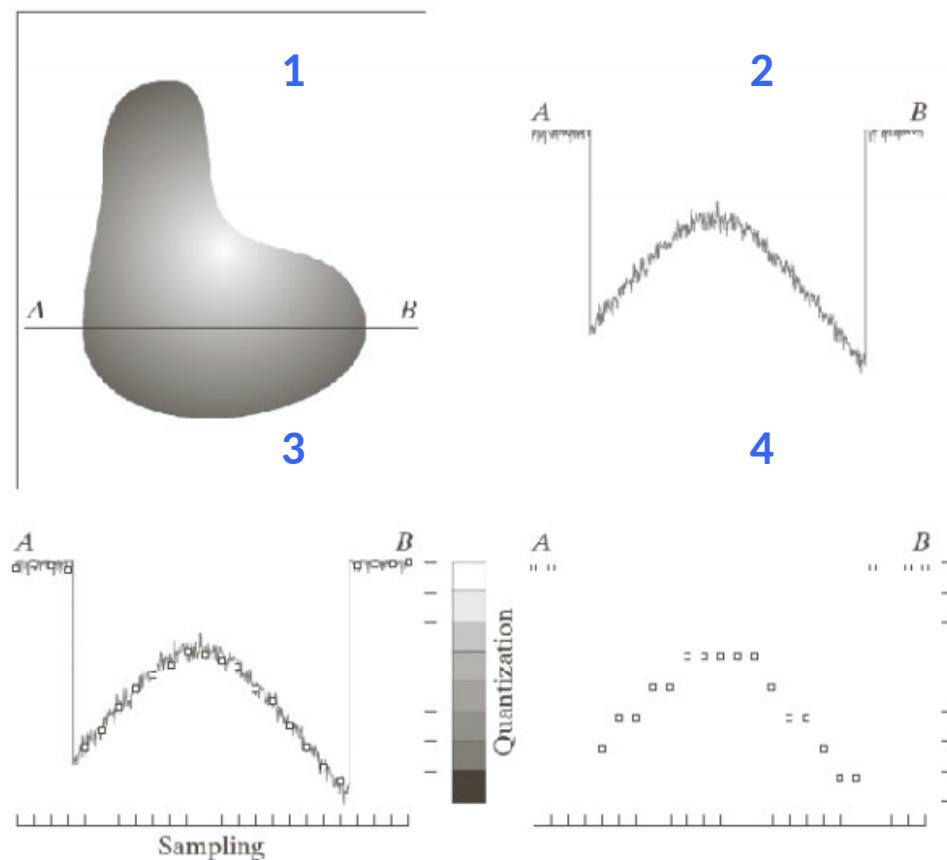
2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Representación de imágenes
 - Dos aspectos fundamentales relacionados con la representación de imágenes, son el muestreo y la cuantificación.
 - Una imagen puede ser continua respecto a las coordenadas “x”, “y” y la amplitud. Para convertirla en su forma digital, debemos muestrear la función de acuerdo a sus coordenadas y su amplitud.
 - Digitalizar los valores de las coordenadas se conoce como muestreo (*sampling*), y la digitalización de la amplitud se llama cuantificación (*quantization*).

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Representación de imágenes

En la ilustración se puede observar el proceso llevado a cabo en el muestreo y cuantificación. En el primer cuadrante se aprecia una imagen continua. En el segundo cuadrante se aprecia la gráfica de amplitud del segmento AB de la imagen. Para realizar el muestreo de la señal, se toman muestras equiespaciadas a lo largo del segmento AB (cuadrante 3). Finalmente, los valores de intensidad deben convertirse a valores discretos (cuadrante 4).



2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Representación de imágenes

– Como se había mencionado anteriormente, podemos considerar a una imagen como una matriz, en la que la fila y la columna representan un punto y el valor del elemento de la matriz corresponde al nivel de gris en dicho punto.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1, 0) & f(M-1, 1) & \dots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix}$$

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Representación de imágenes
 - Para la representación de la imagen, supondremos que se tienen **M** filas y **N** columnas y **G** niveles de grises.
 - Designaremos como **Nivel de Gris l** a la intensidad de luz de la imagen f. El rango de variación del nivel de gris es:

$$L_{\min} \leq l \leq L_{\max}$$

- En la práctica el valor de $L_{\min} = i_{\min} r_{\min} \sim 0,0005$ y el valor de $L_{\max} = i_{\max} r_{\max} \sim 100$ en la mayoría de aplicaciones.
- Al intervalo $[L_{\min}, L_{\max}]$ se le conoce como Escala de Grises y generalmente se desplaza al intervalo $[0, L]$, donde $l=0$ representa el color negro y $l=L$ representa el color blanco.

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Representación de imágenes
 - Los valores de M y N no tienen restricción en cuanto a su tamaño, sin embargo, se representa L como un número entero potencia de 2 debido a restricciones de cuantificación y almacenamiento:
 - El número de bits que se requiere para representar una imagen viene dado por:

$$L = 2^k$$

$$b = M \times N \times K$$

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Relaciones básicas entre pixeles: Vecindad
 - Un punto p con coordenadas (x,y) puede tener 4 u 8 vecinos:
 - Los 4 vecinos horizontales y verticales cuyas coordenadas son:

$$N_4(p) = (x+1, y), (x-1, y), (x, y-1), (x, y+1)$$

- Los 4 vecinos diagonales son:

$$N_D(p) = (x-1, y-1), (x-1, y+1), (x+1, y-1), (x+1, y+1)$$

- Los 8 vecinos se conforman de $N_4(p)$ y $N_D(p)$, y se denota por $N_8(p)$

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Relaciones básicas entre pixeles: Vecindad

(x-1, y-1)	(x, y-1)	(x+1,y-1)
(x-1, y)	(x, y)	(x+1, y)
(x-1, y+1)	(x, y+1)	(x+1, y+1)

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Relaciones básicas entre píxeles: Conectividad
 - Para establecer si dos puntos están conectados, se debe determinar si son adyacentes en algún sentido y si su nivel de gris satisface algún criterio de similitud. Por ejemplo, considerar solo los píxeles en el rango de gris 1 a 30.
 - Con ello tenemos dos tipos de conectividad:
 - 4-Conectividad . – dos puntos p y q con valores de gris en el mismo rango están 4-Conectados si q está en $N_4(p)$
 - 8-Conectividad . – dos puntos p y q con valores de gris en el mismo rango están 8-Conectados si q está en $N_8(p)$

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Relaciones básicas entre píxeles: Conectividad
 - ¿Cuántos objetos existen si se usa 4-Conectividad y 8-Conectividad?

0	0	0	0	0	0
0	13	43	0	34	22
0	12	0	54	98	67
0	21	45	0	86	0
0	0	0	0	76	0

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Relaciones básicas entre pixeles:
 - Dados los puntos p y q , con coordenadas (x, y) , (s, t) , respectivamente, tenemos:
 - Distancia Euclídea: $D(p, q) = \sqrt{(x - s)^2 + (y - t)^2}$
 - Distancia D_4 : $D_4(p, q) = |x - s| + |y - t|$

		2		
	2	1	2	
2	1	0	1	2
	2	1	2	
		2		

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Relaciones básicas entre pixeles:
 - Distancia D_8 : $D_8(p, q) = \max(|x - s|, |y - t|)$

2	2	2	2	2
2	1	1	1	2
2	1	0	1	2
2	1	1	1	2
2	2	2	2	2

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Operaciones sobre imágenes
 - Aritméticas
 - Suma: $p+q$ (promediado para eliminación de ruido)
 - Resta: $p-q$ (eliminación de información estática para detección de movimiento)
 - Multiplicación: αp (aumentar niveles de gris)
 - División: p/α
 - Lógicas:
 - AND, OR, NOT
 - A nivel punto (por ejemplo, umbralización):

$$g(i,j) = O_{point}\{f(i,j)\}$$

2. Fundamentos de las imágenes digitales

- Operaciones sobre imágenes
 - A nivel local, sobre una vecindad usando máscaras de convolución (suavizado o detección de bordes):

$$g(i,j) = O_{local}\{f(i_k, j_k); (i_k, j_k) \in N(i, j)\}$$

- A nivel global, que dependen de toda la imagen (por ejemplo, la transformada de Fourier o el histograma).

Referencias Bibliográficas

[1] MARIÑO X., "Revisitando la estructura de la retina humana: evolución y eficacia", Diciembre del 2010. URL:

<http://naukas.com/2010/12/20/revisitando-la-estructura-de-la-retina-humana-evolucion-y-eficacia/>

[2] BONILLA K., "Sistema Nervioso", URL:

<http://lalupa3.webcindario.com/biologia/Sistema%20nervioso.htm>

[3] Grupo de Investigación S.A.B.I.A. URL:

<http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/VisionArtificial/index.html>.

[4] GONZÁLEZ R., and WOODS R., "Digital Image Processing", Third Edition, Prentice Hall, 2008.