

Visión espacial: MTF y sensibilidad al contraste (CSF)

PERCEPCIÓN VISUAL

Tema 11

Profesora María Cinta Puell
Grado Óptica y Optometría



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
MADRID

Índice

- Introducción visión espacial
- Características de la rejilla de onda sinusoidal
- Función de sensibilidad al contraste espacial (CSF)
 - MTF del sistema óptico del ojo
 - CSF retinocortical
- Relación entre la resolución espacial y la CSF
- CSF y campos receptores: canales de frecuencia espacial
- Factores que afectan a la CSF

Introducción: visión espacial

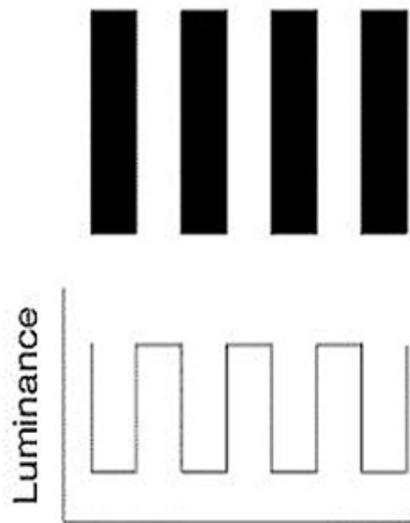
- Capacidad del sistema visual para detectar y resolver estímulos definidos por cambios de luminancia (distintos tamaños y contrastes) en el espacio.
- La medición de la AV solo está relacionada con la visión espacial de objetos muy pequeños y generalmente de alto contraste.
- La mayoría de los objetos son más grandes que el límite de resolución y tienen un contraste más bajo.
- **Función de sensibilidad al contraste**
 - Estímulos: **rejillas o redes de onda sinusoidal**.
 - Sirven para construir estímulos más complejos.

Características rejilla onda sinusoidal

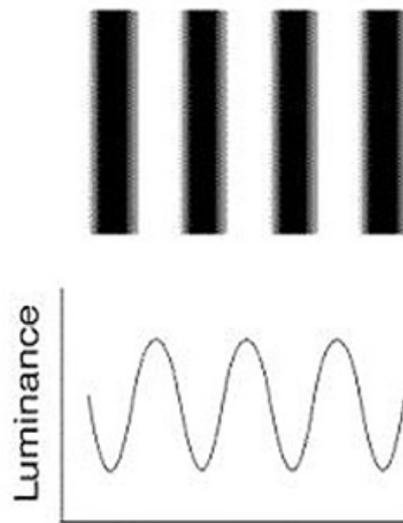
- Perfil de luminancia
- Frecuencia espacial
- Contraste
- Análisis Fourier y campos receptivos corticales

Características de la rejilla de onda sinusoidal

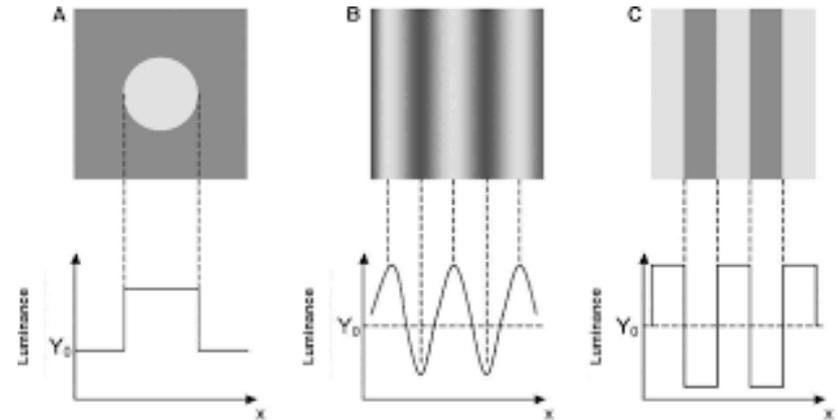
Perfil de luminancia



Rejilla de onda cuadrada



Rejilla de onda sinusoidal

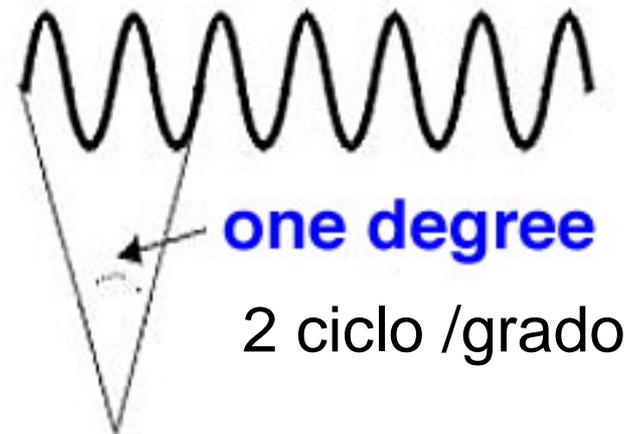
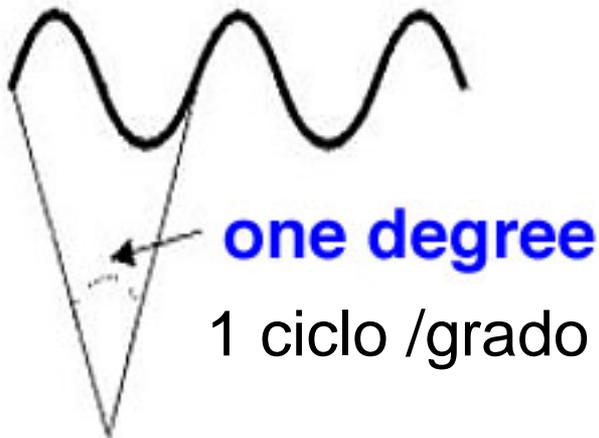
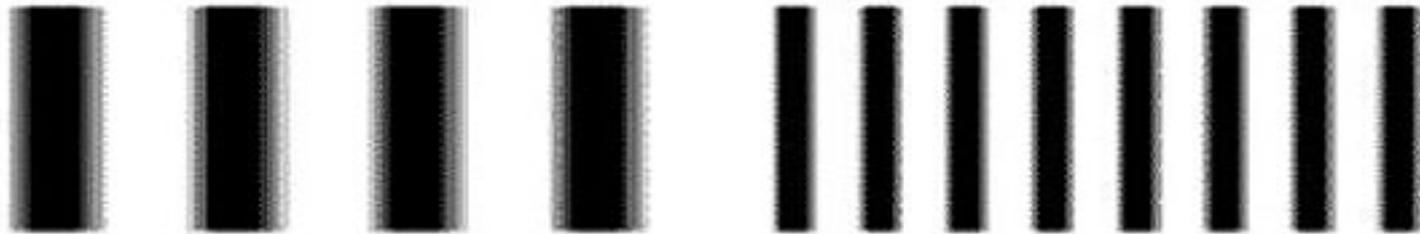


Perfil de luminancia: la transición entre las barras claras y oscuras es una transición gradual (sinusoidal), no una transición abrupta.

Características de la rejilla de onda sinusoidal

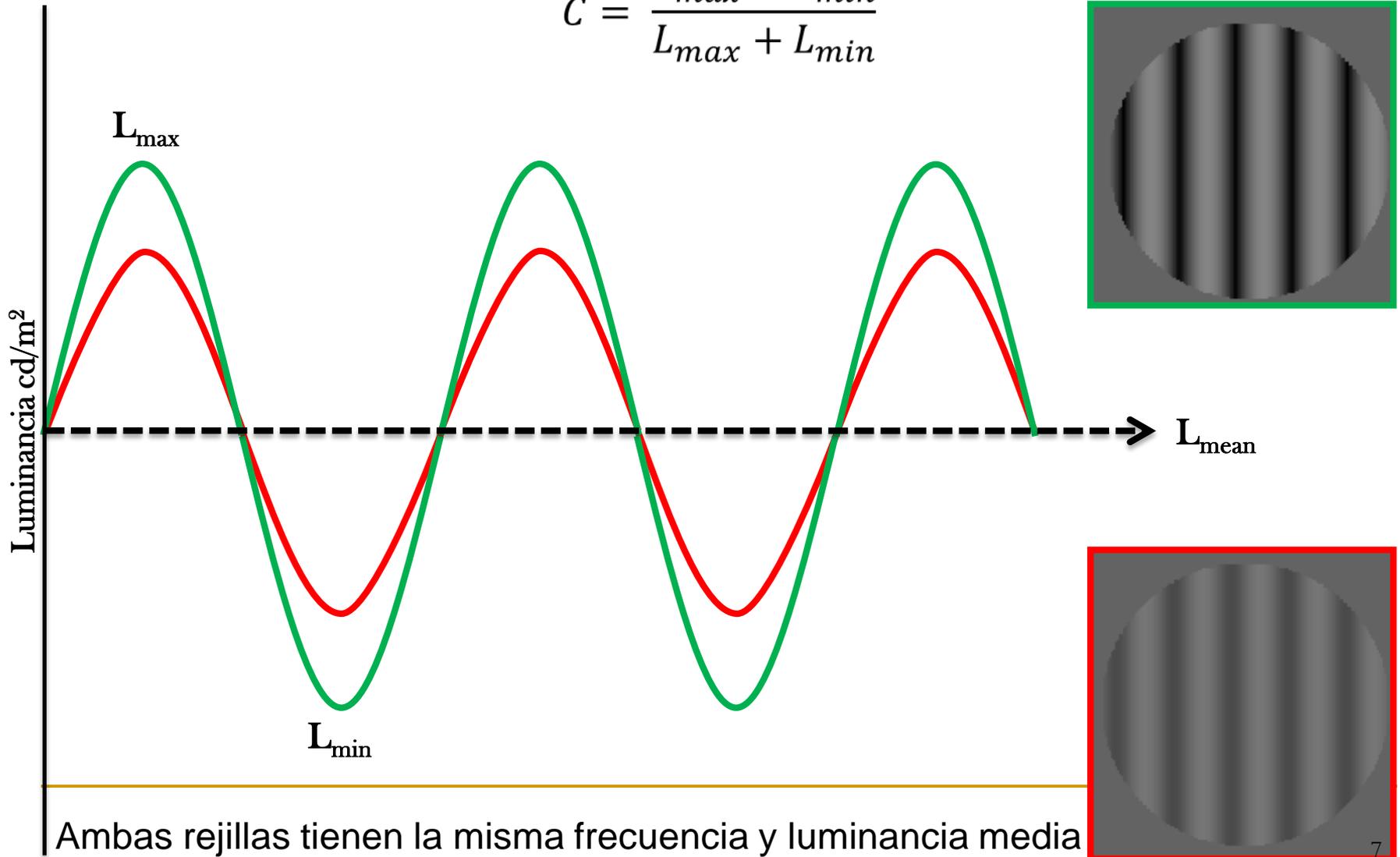
Frecuencia espacial

Número de ciclos por grado de ángulo visual (c/g)



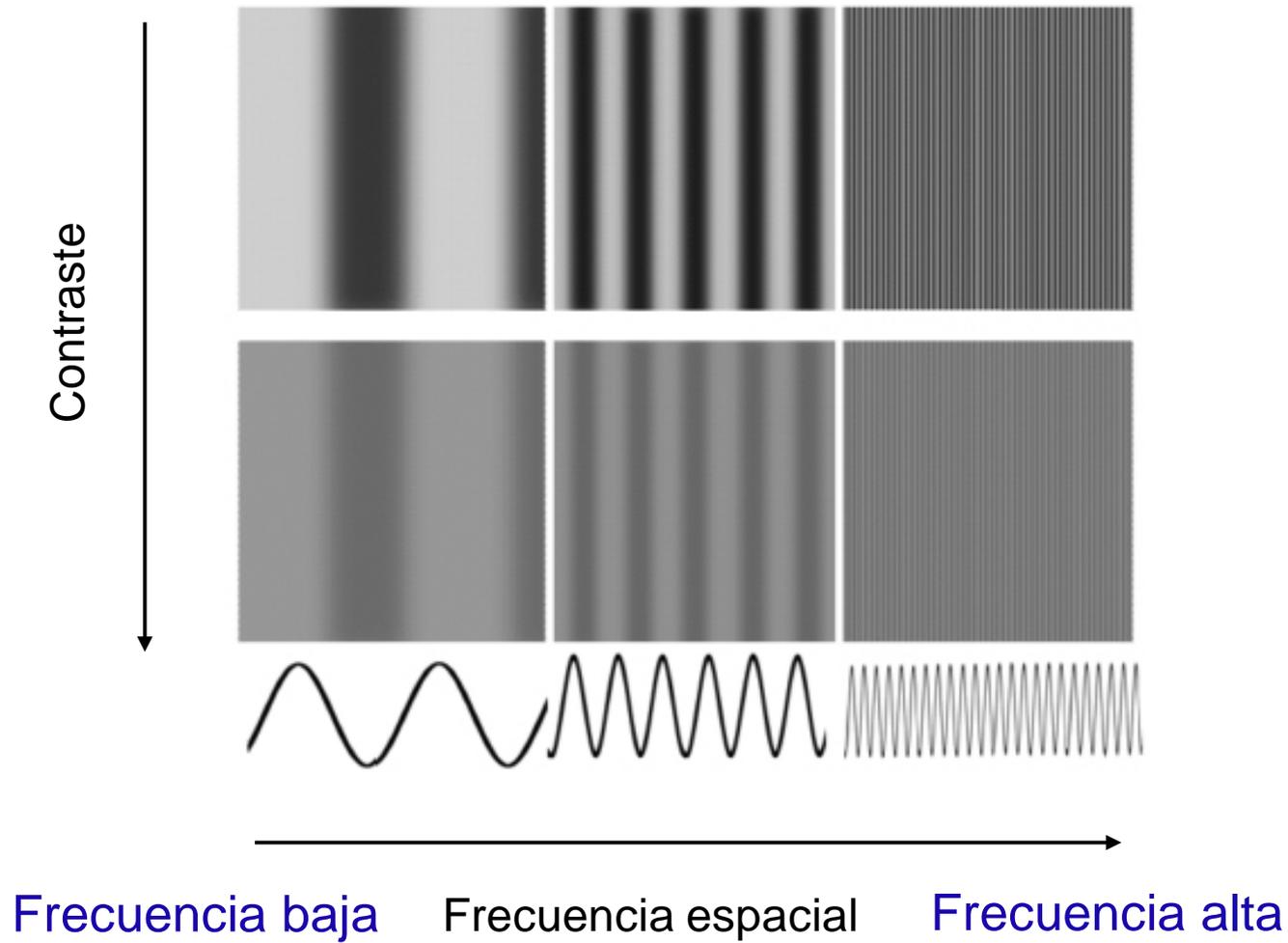
Características de la rejilla de onda sinusoidal

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$



Ambas rejillas tienen la misma frecuencia y luminancia media

Características de la rejilla de onda sinusoidal

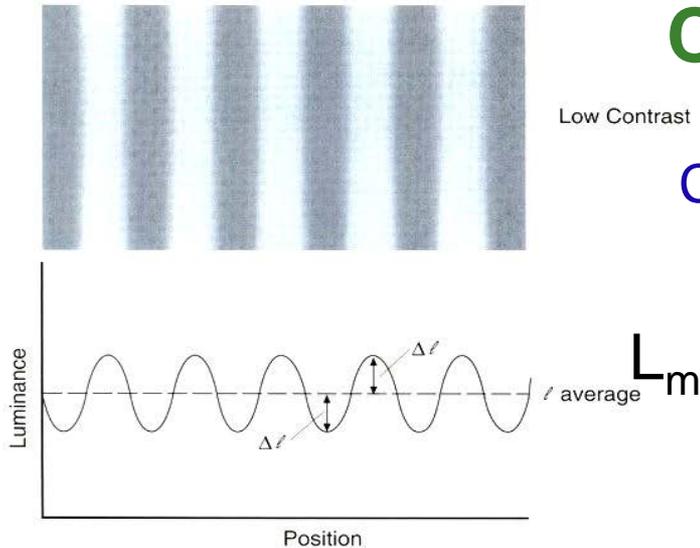


Características de la rejilla de onda sinusoidal

Contraste

Low Contrast

Contraste bajo



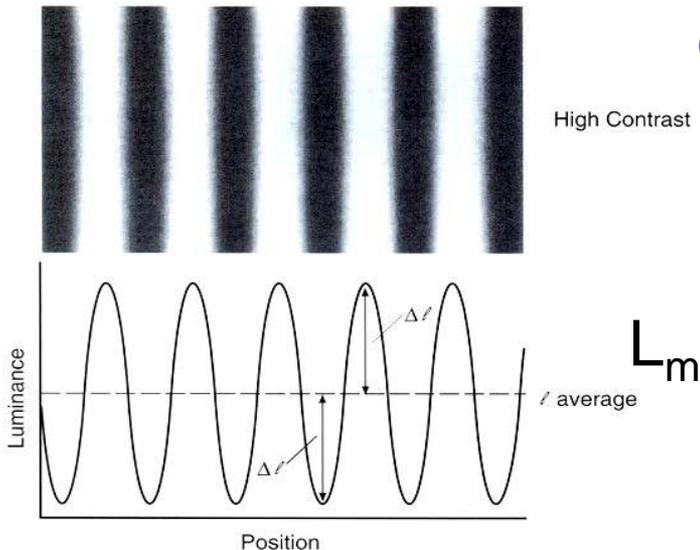
Las dos rejillas tienen:

- Igual frecuencia espacial
- Igual luminancia media

$$L_m = \frac{L_{m\acute{a}x} + L_{m\acute{i}n}}{2}$$

Contraste alto

High Contrast

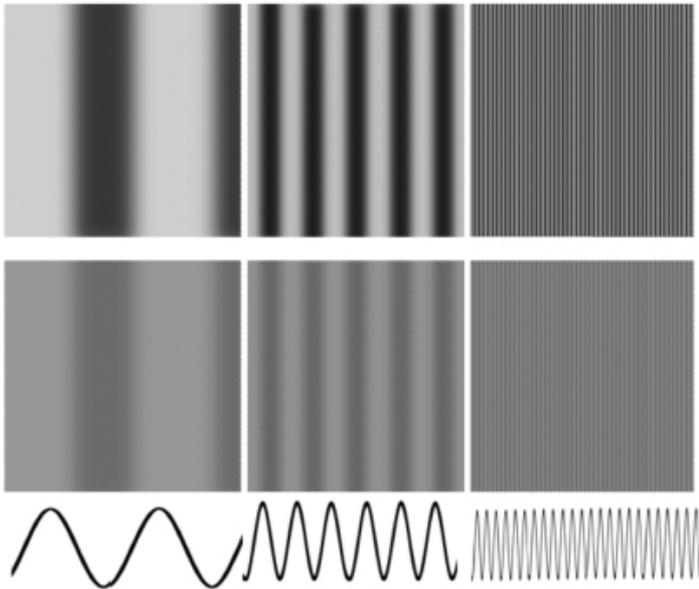


- **Distinto contraste**

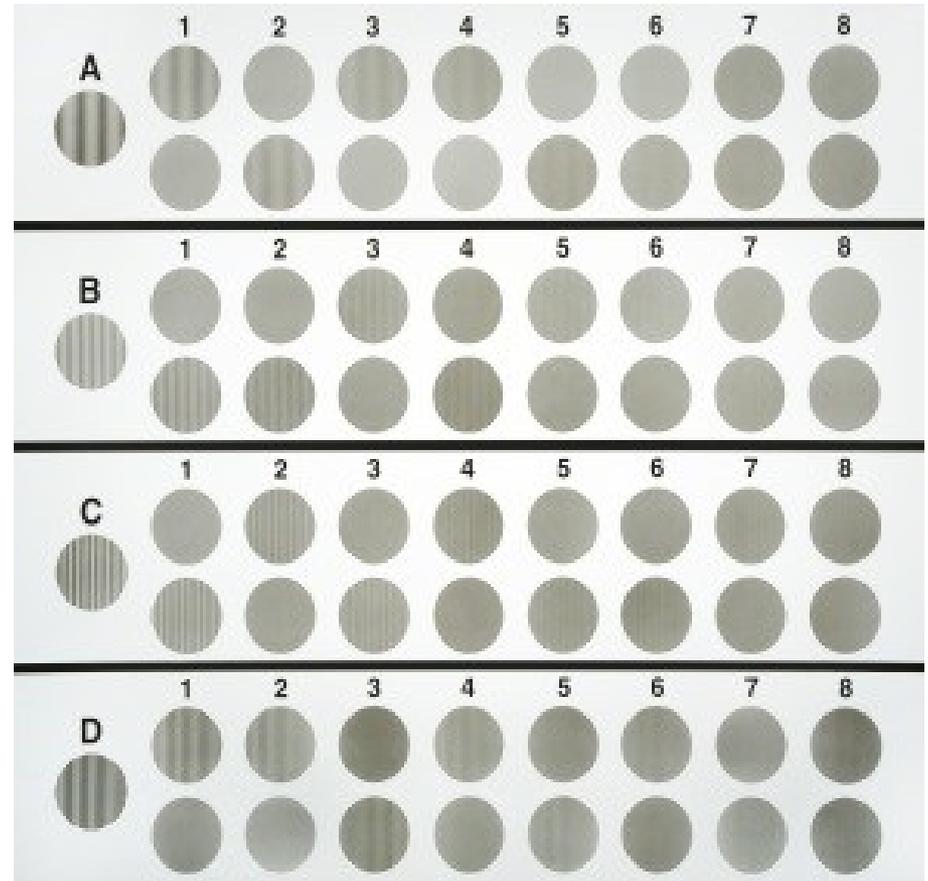
ΔL = Amplitud de Contraste

$$C = \frac{\Delta L}{L_m}$$

Características de la rejilla de onda sinusoidal



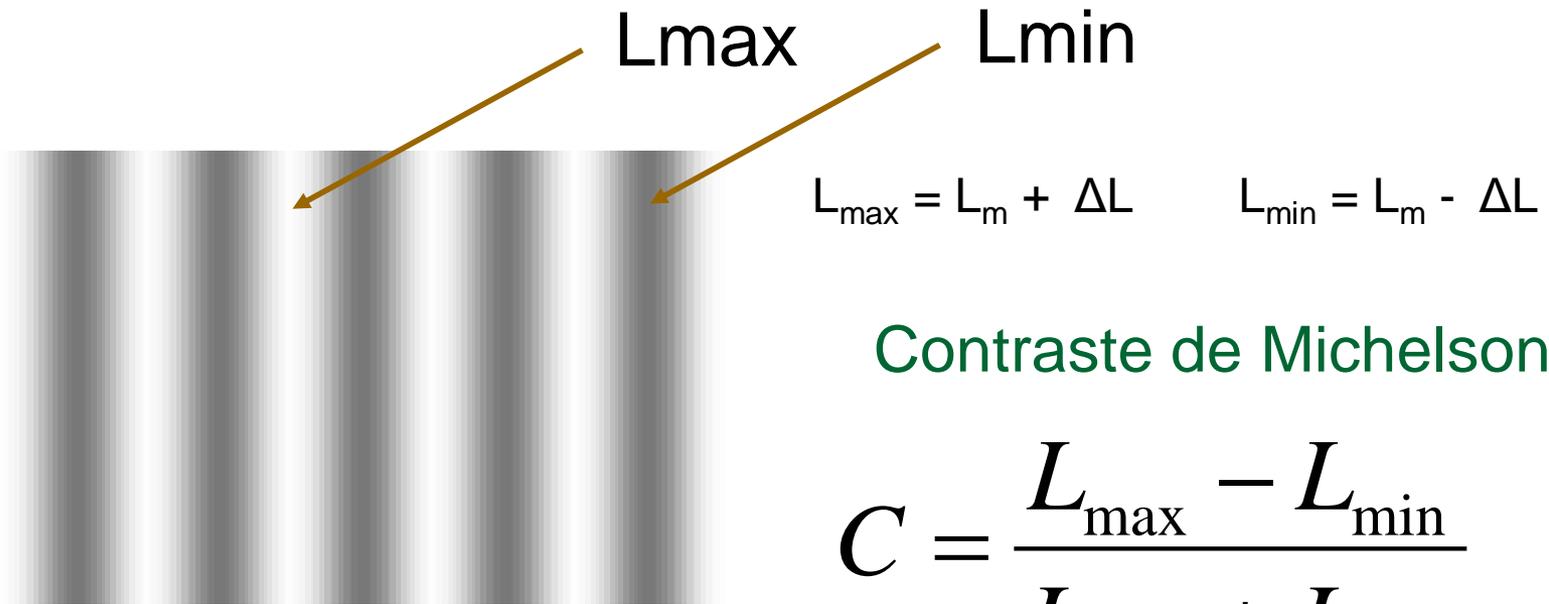
Test sensibilidad al contraste CSV-1000



Características de la rejilla de onda sinusoidal

Contraste

$$C = \frac{\Delta L}{L_m} \longrightarrow \text{Contraste de Weber}$$



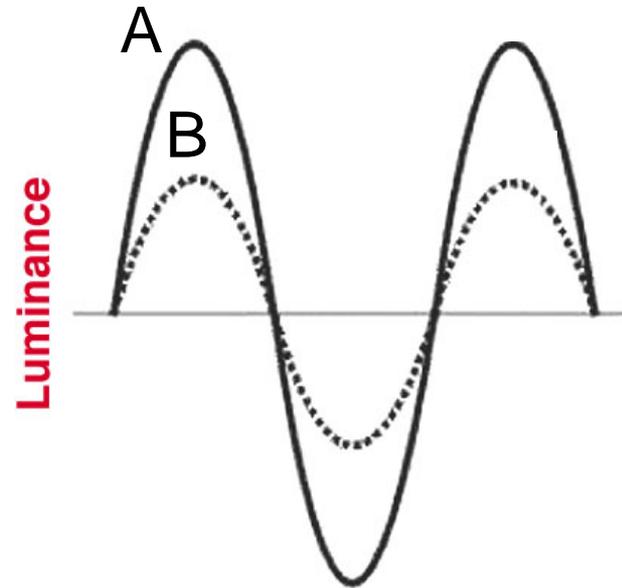
Contraste de Michelson

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$

$$0 \leq C \leq 1$$

Características de la rejilla de onda sinusoidal

Contraste



Curva	$L_{\text{mín}}$	$L_{\text{máx}}$	L media	Contraste
A	0	80	40	1
B	30	50	40	0,25

$$L_{\text{máx}} = L_m + \Delta L$$

$$L_{\text{mín}} = L_m - \Delta L$$

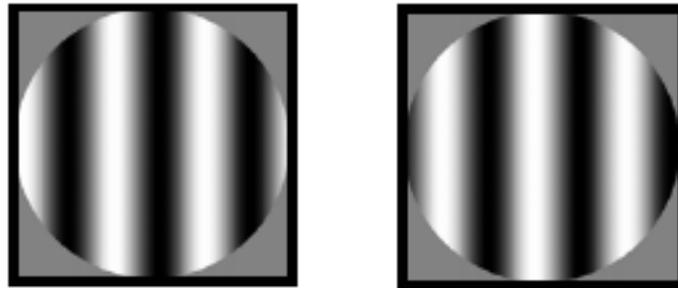
Características de la rejilla de onda sinusoidal

Orientación



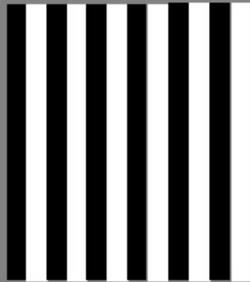
Se detectan mejor las orientaciones vertical y horizontal

Fase espacial



Luminance Gratings

HIGH
Luminance Contrast



MEDIUM
Luminance Contrast

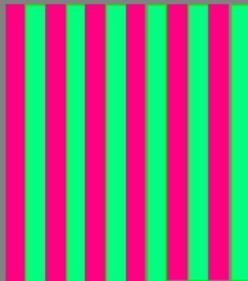


LOW
Luminance Contrast



Chromatic Red/Green (Isoluminant) Gratings

HIGH
Chromatic Contrast



MEDIUM
Chromatic Contrast



LOW
Chromatic Contrast



Características de la rejilla de onda sinusoidal

Estímulo simple

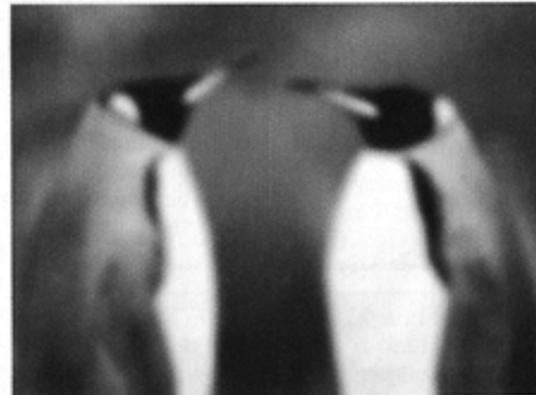
Sumando rejillas de onda sinusoidal de diferente frecuencia espacial, contraste y orientación se pueden construir estímulos más complejos:

Análisis de Fourier (sistema lineal)

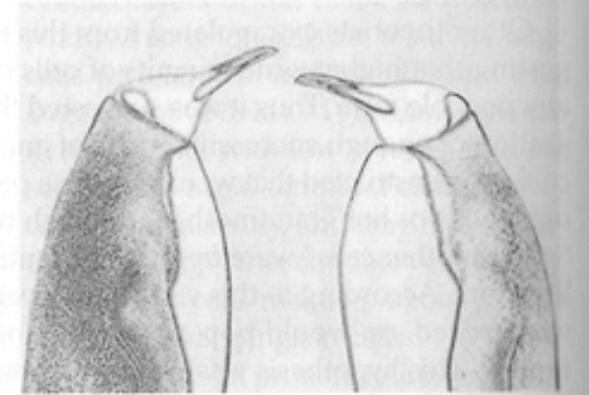
(e) Normal



(f) High frequencies filtered out



(g) Low frequencies filtered out



El sistema visual se comporta como un analizador de Fourier para determinadas tareas y descompone la imagen retiniana en sus componentes de frecuencia espacial: **sistema lineal**

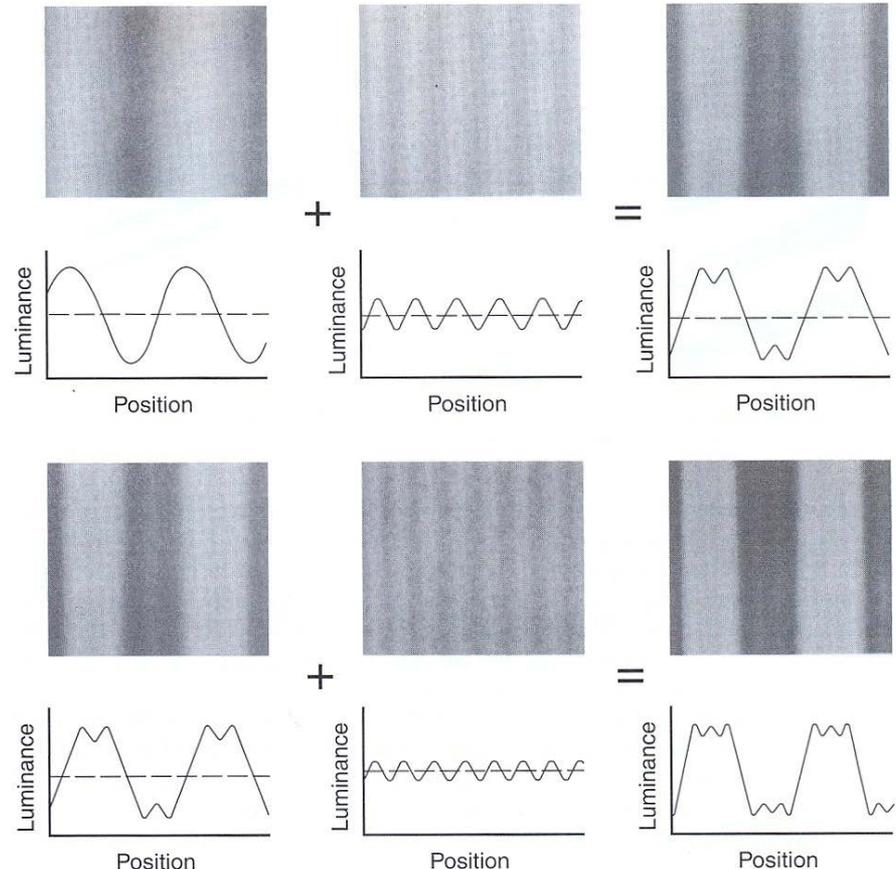
Características de la rejilla de onda sinusoidal

Estímulo simple

Sumando ondas sinusoidales de diferente frecuencia, contraste y orientación se puede construir un estímulo espacial más complejo

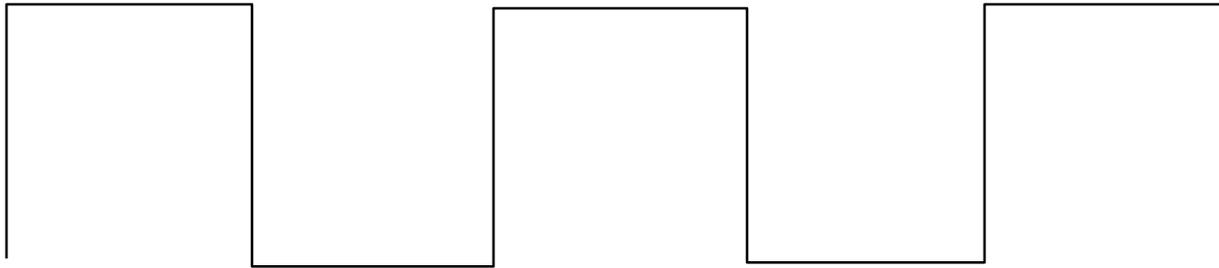
Por ejemplo una onda cuadrada:

Una rejilla de onda sinusoidal de la frecuencia fundamental se combina con sus armónicos tercero (superior) y quinto (inferior) para producir una rejilla de onda cuadrada

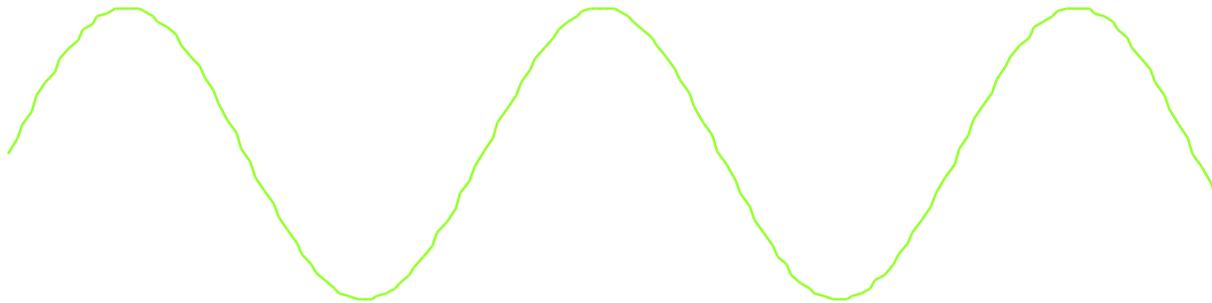


Análisis de Fourier

Síntesis de Fourier para generar una onda cuadrada

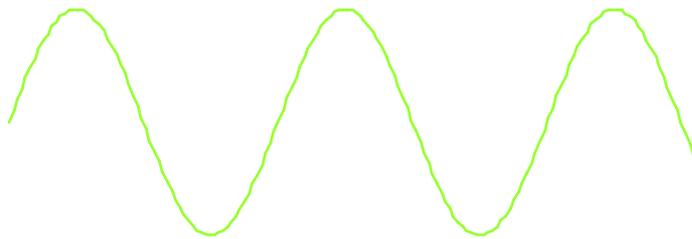


Empezar con una onda sinusoidal de la misma frecuencia



Síntesis de Fourier para una onda cuadrada

Fundamental



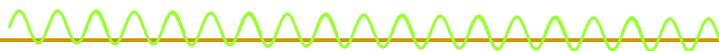
3 x frec 1/3 contraste



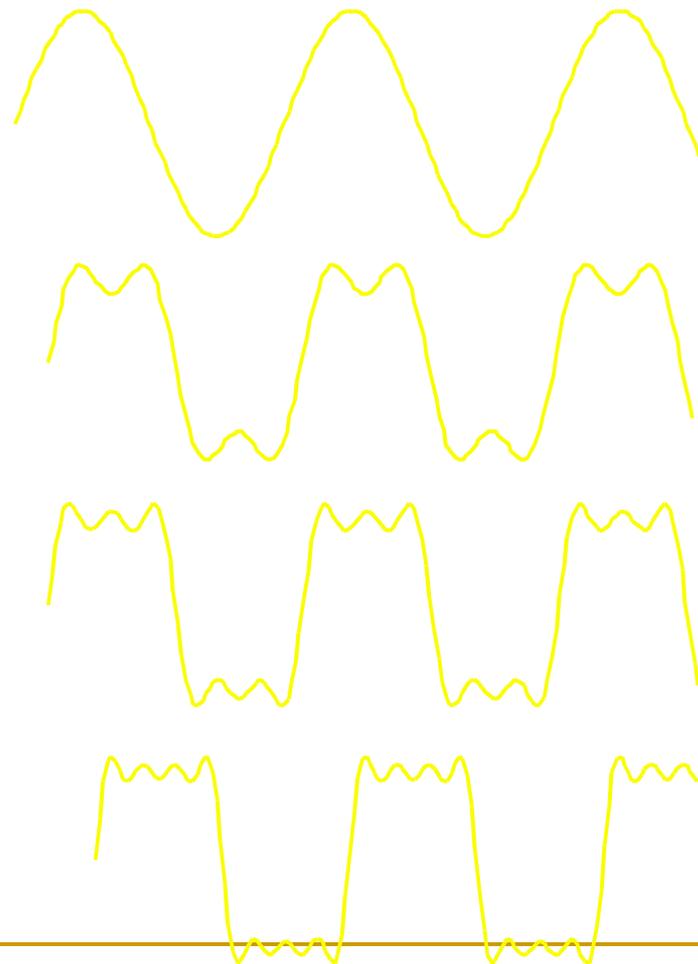
5 x frec 1/5 contraste



7 x frec 1/7 contraste



A
r
m
ó
n
i
c
o
s

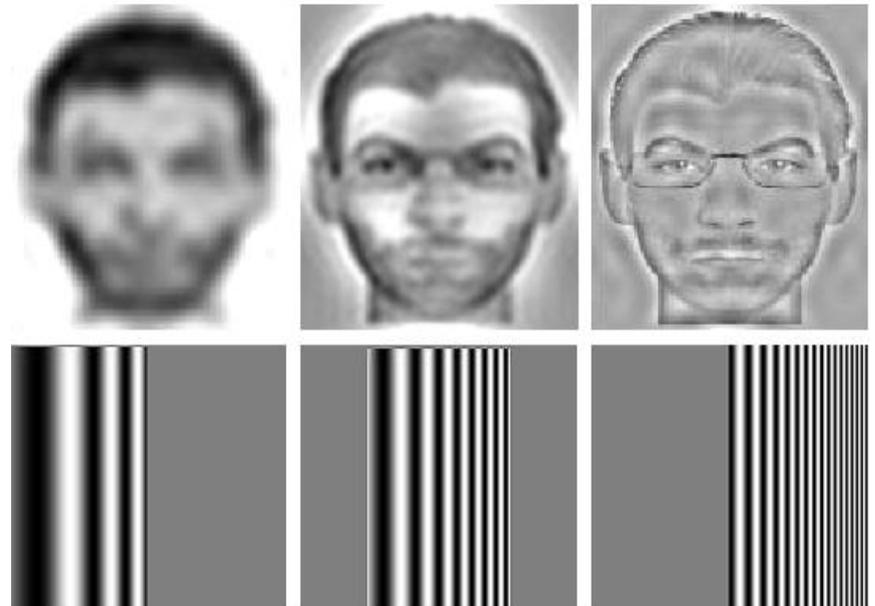


Análisis de Fourier

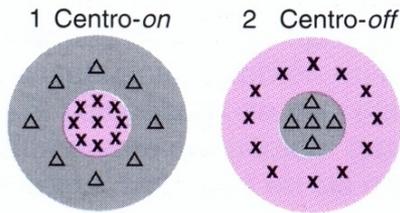
Cualquier imagen se pueden descomponer en un conjunto de rejillas sinusoidales



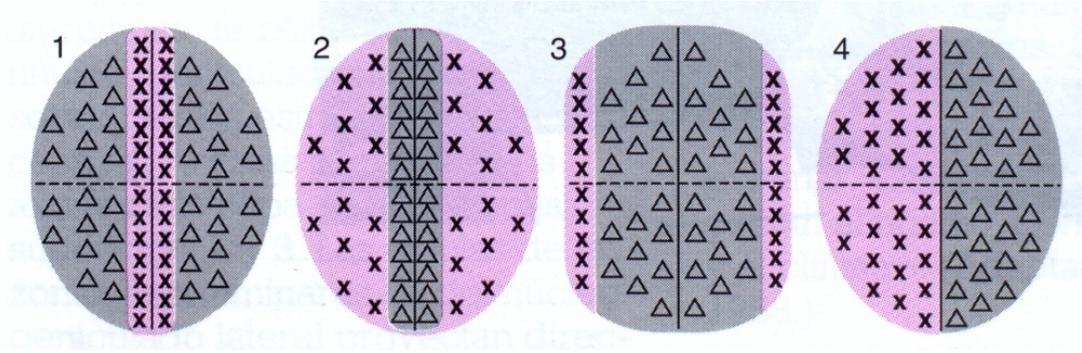
Las rejillas de **alta frecuencia** contribuyen a la formación de los **detalles** y las rejillas de **baja frecuencia** a las **formas generales**.



Campos receptivos corticales

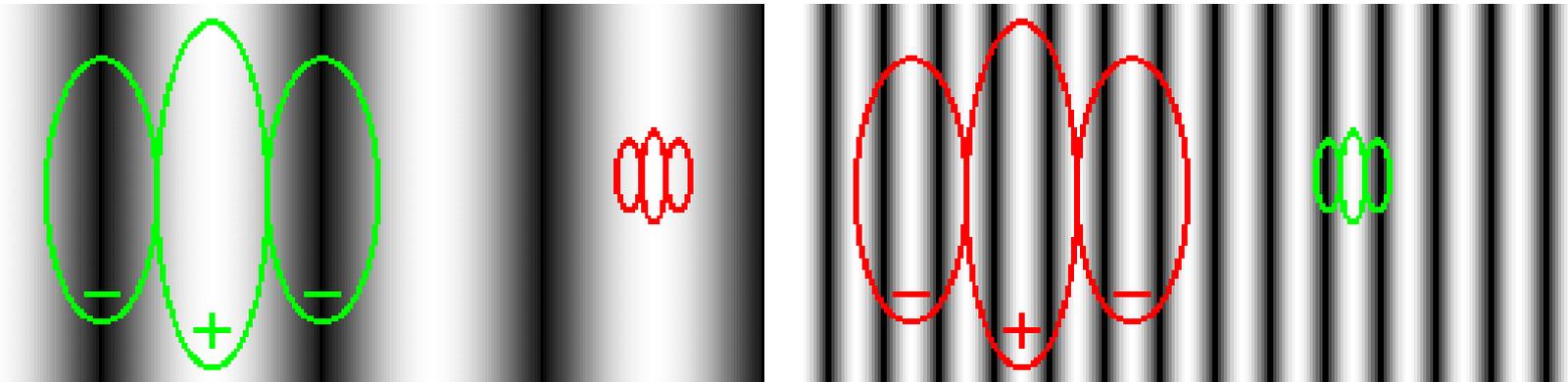


Campos receptivos retina



Campos receptivos células corticales

Las neuronas responden a frecuencias espaciales específicas



Frecuencia espacial baja – CR grande Frecuencia espacial alta – CR pequeño

Canales de frecuencia espacial independientes

Función de sensibilidad al contraste (CSF)

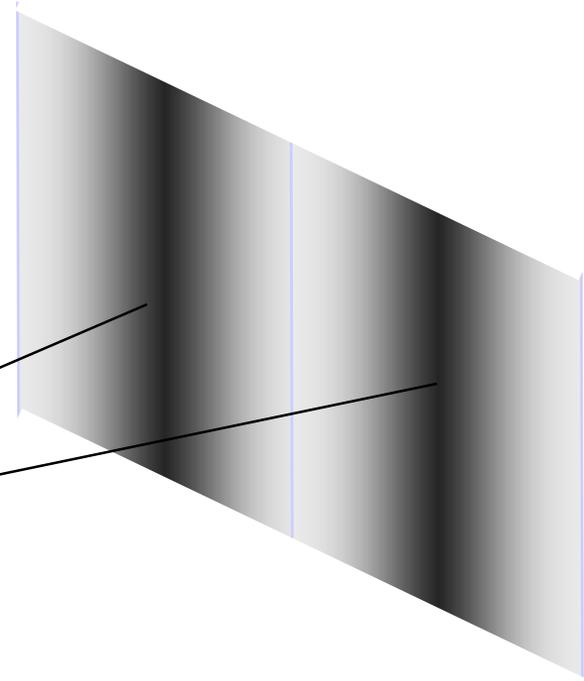
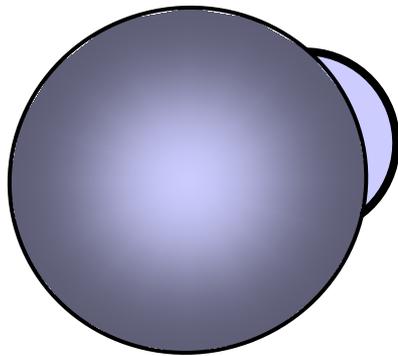
- Sensibilidad al contraste espacial CSF
- Función de Transferencia al Contraste MTF
- CSF Retinocortical
- Relación entre agudeza y CSF
- CSF y canales de frecuencia o campos receptivos
- Factores que afectan a la CSF

Sensibilidad al contraste

Para una frecuencia espacial

$$SC = 1 / \text{umbral de contraste}$$

Contraste umbral: mínimo contraste para poder detectar una red



Los umbrales se determinan para diferentes frecuencias espaciales para obtener la **función de sensibilidad de contraste (CSF)**

Bajo

Contraste

Alto

Baja

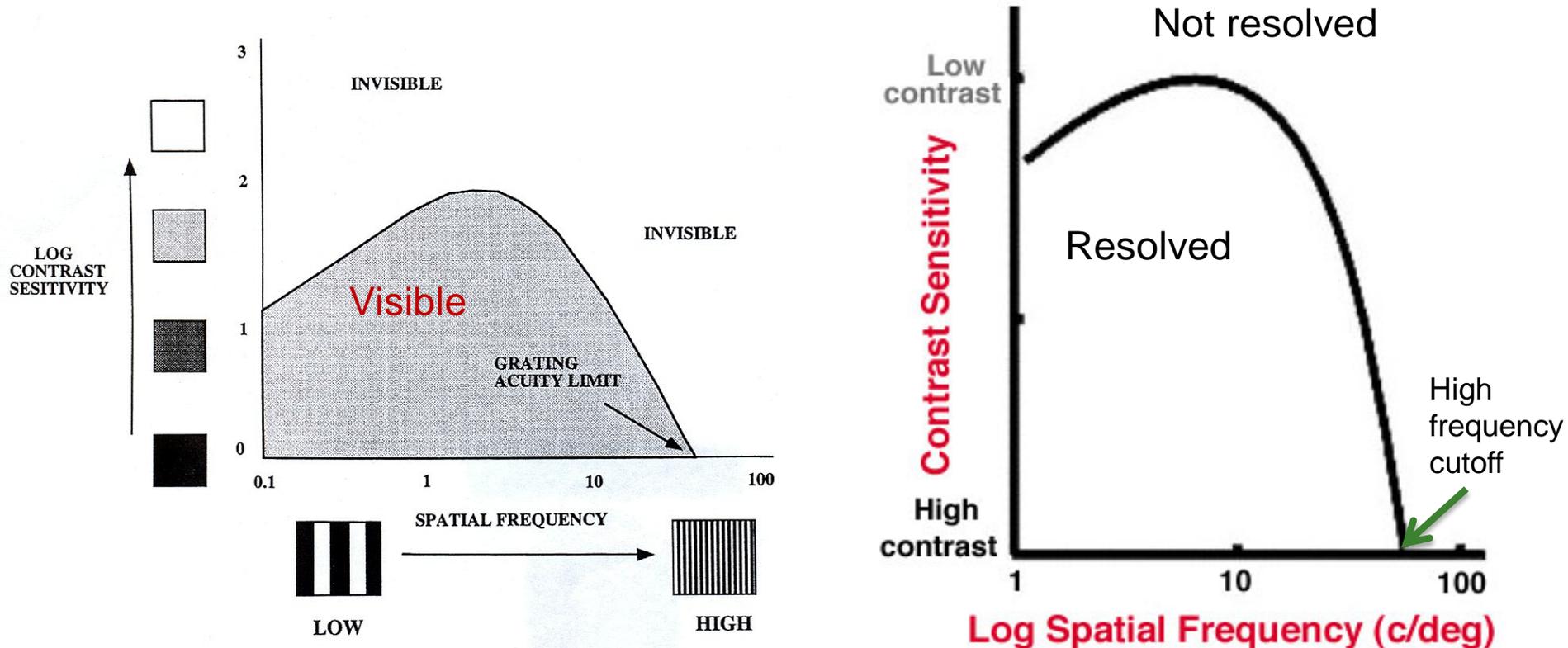
Frecuencia espacial

Alta

Función de sensibilidad al contraste

CSF espacial

Función pasa-banda Sensibilidad máxima 3 - 5 c/g



Las rejillas de frecuencias intermedias se ven en niveles de contraste más bajos que los necesarios para ver otras frecuencias espaciales.

Función de sensibilidad al contraste

Como de bien se ven las rejillas está determinado por:

- Los componentes ópticos del ojo
- El procesamiento neuronal en la vía visual

CSF total = MTF óptica del ojo x CSF retinocortical

Función Transferencia Contraste MTF

Se puede cuantificar la precisión con la que una lente óptica (o sistema) transfiere información.

Contraste Objeto

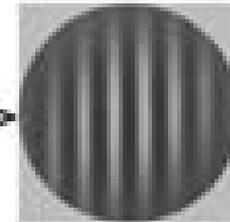


Contrast 100%



Lens

Contraste Imagen



Contrast 55%

Factor de transferencia de modulación o contraste

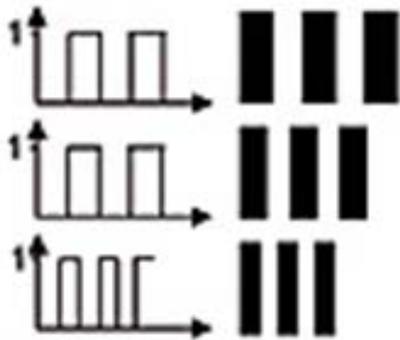
$$T = C_i / C_o$$

El procedimiento se repite para un espectro de frecuencias espaciales que permita obtener la MTF

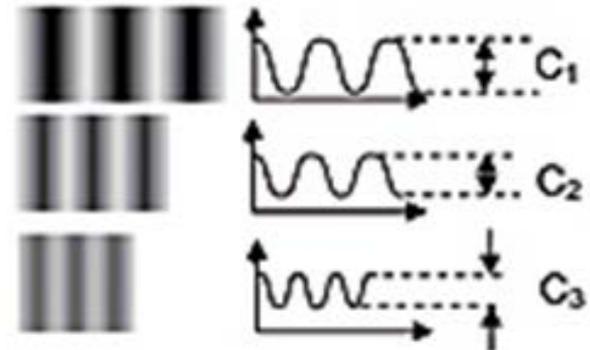
Función Transferencia Contraste MTF

Como transfiere un sistema óptico (ojo) el contraste del objeto a la imagen para diferentes frecuencias espaciales

Contraste objeto (100%)

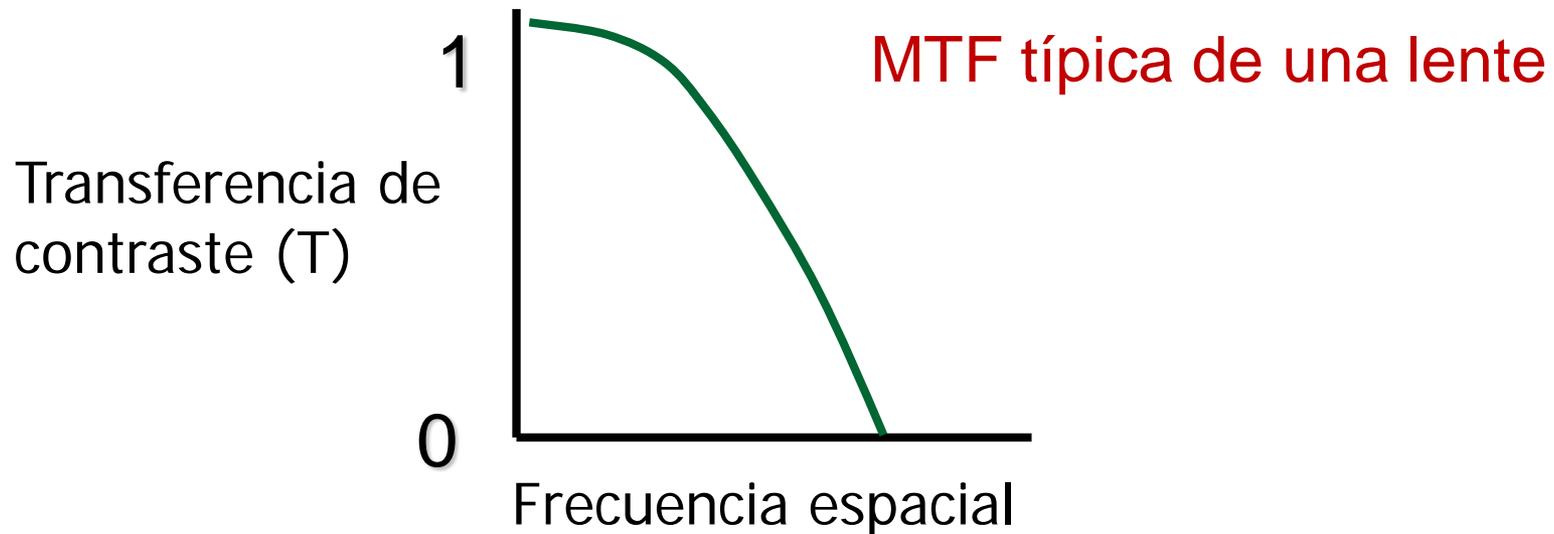


Contraste imagen %
(depende de la frecuencia)



Transferencia de modulación o contraste (T) = C_i / C_o

Función Transferencia Contraste MTF



Para frecuencias espaciales bajas, el factor de transferencia T es casi unidad. A medida que aumenta la frecuencia espacial, T disminuye hasta llegar a cero.

La lente reproduce bien el contraste de las frecuencias espaciales bajas pero atenúa las frecuencias más altas (debido a las aberraciones).

Función Transferencia Contraste MTF

- La MTF informa sobre como un sistema óptico transfiere el contraste del objeto a la imagen para diferentes frecuencias espaciales
- La MTF describe la calidad de la reproducción de imágenes ópticas en función de la frecuencia espacial.
- Relación entre la pérdida de contraste y la frecuencia espacial

Análisis de sistema lineal

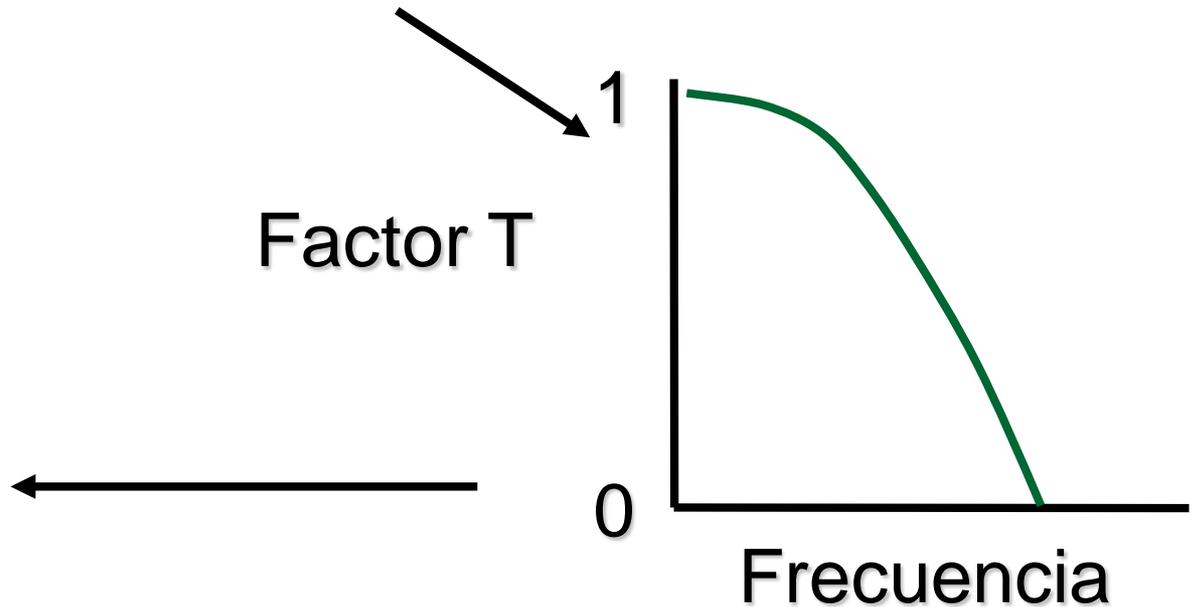


Apariencia de la imagen a través de la lente

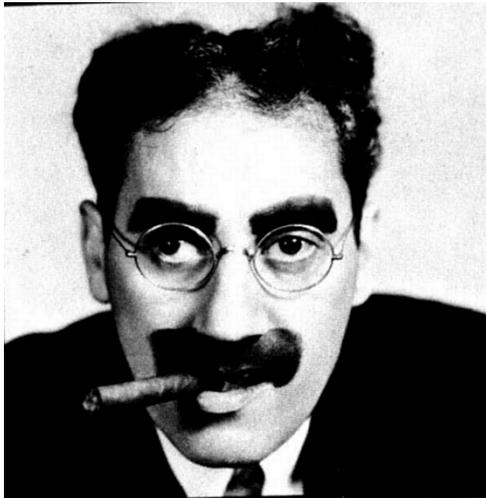
Aplicando MTF



Factor T



Análisis de sistema lineal

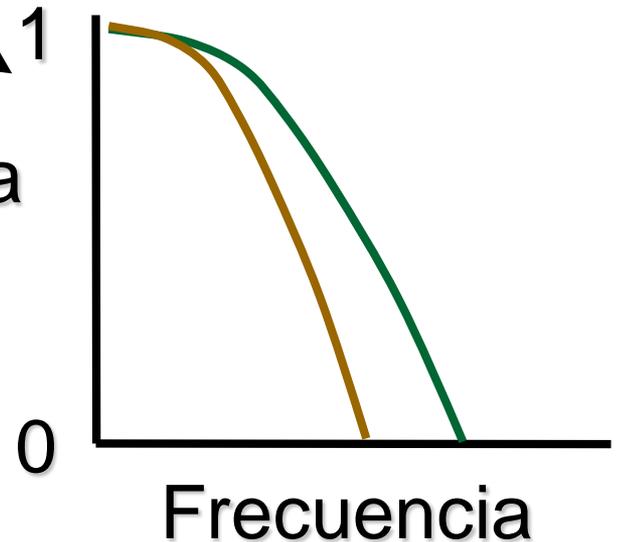


Apariencia de la imagen a través de la lente

Aplicando MTF



Transferencia de contraste



El desenfoque reduce la calidad de la imagen principalmente a frecuencias espaciales altas

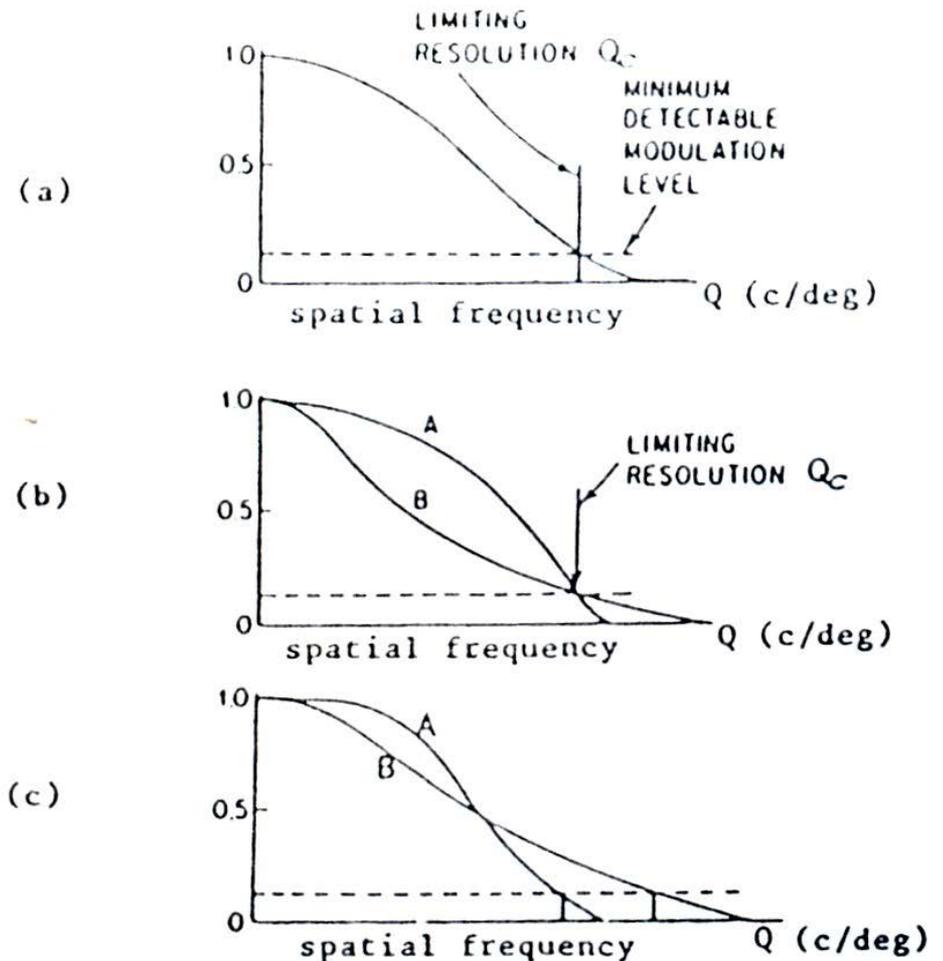
Función Transferencia Contraste MTF

Ejemplos de sistemas ópticos de diferente calidad

Las frecuencias espaciales altas se corresponden con resolución de detalles

Las frecuencias bajas con resolución de objetos grandes

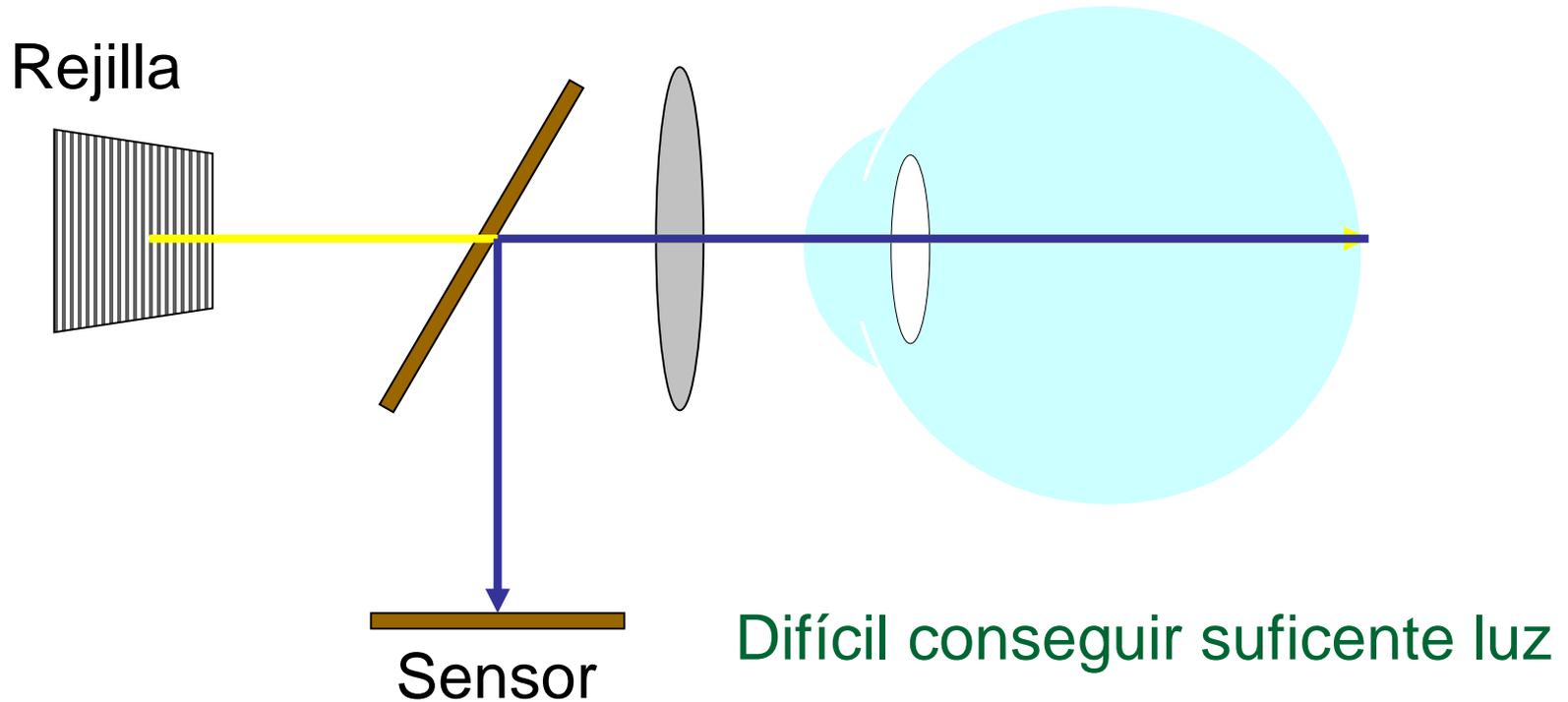
El límite de resolución es la frecuencia de corte.



MTF del sistema óptico ocular

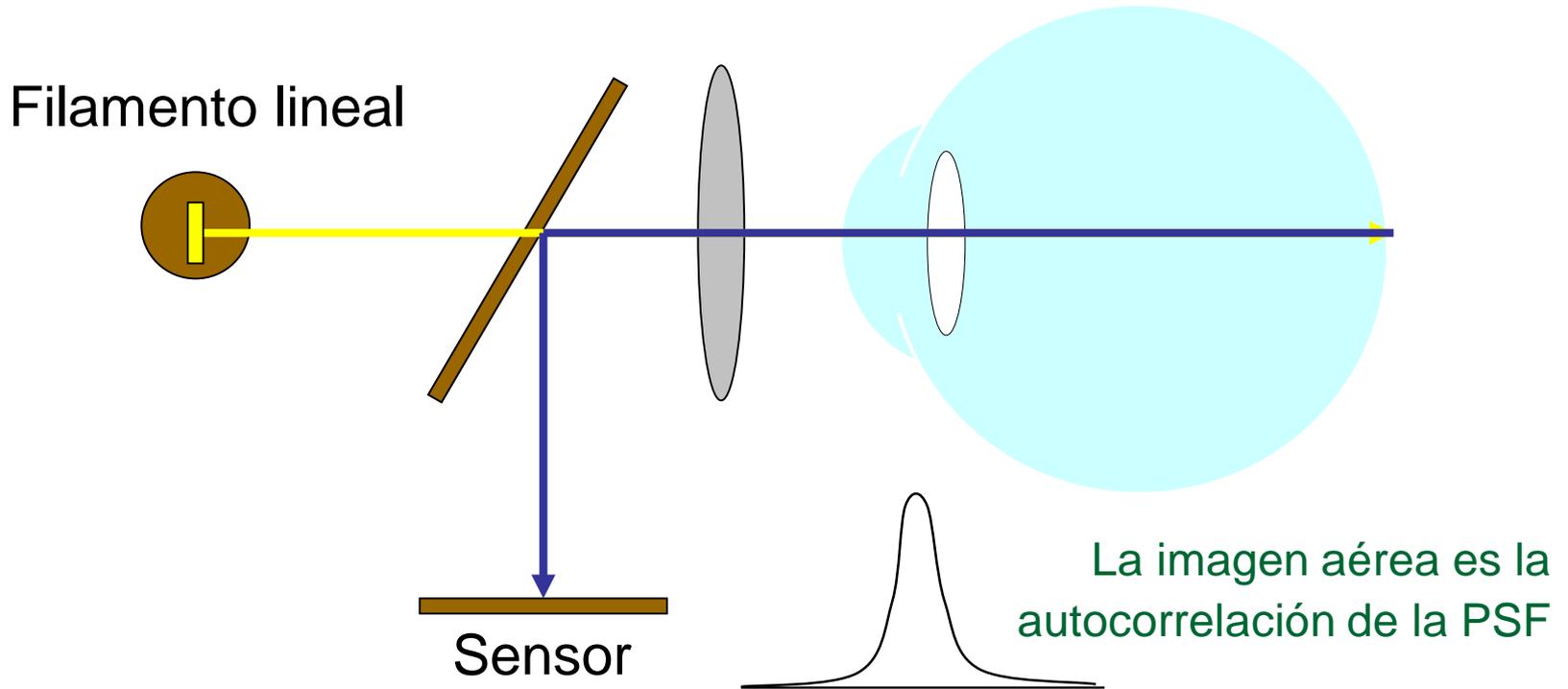
Obtención de la MTF por el método de doble paso

La luz pasa a través del sistema óptico del ojo 2 veces:
hacia la retina y vuelve hacia atrás otra vez



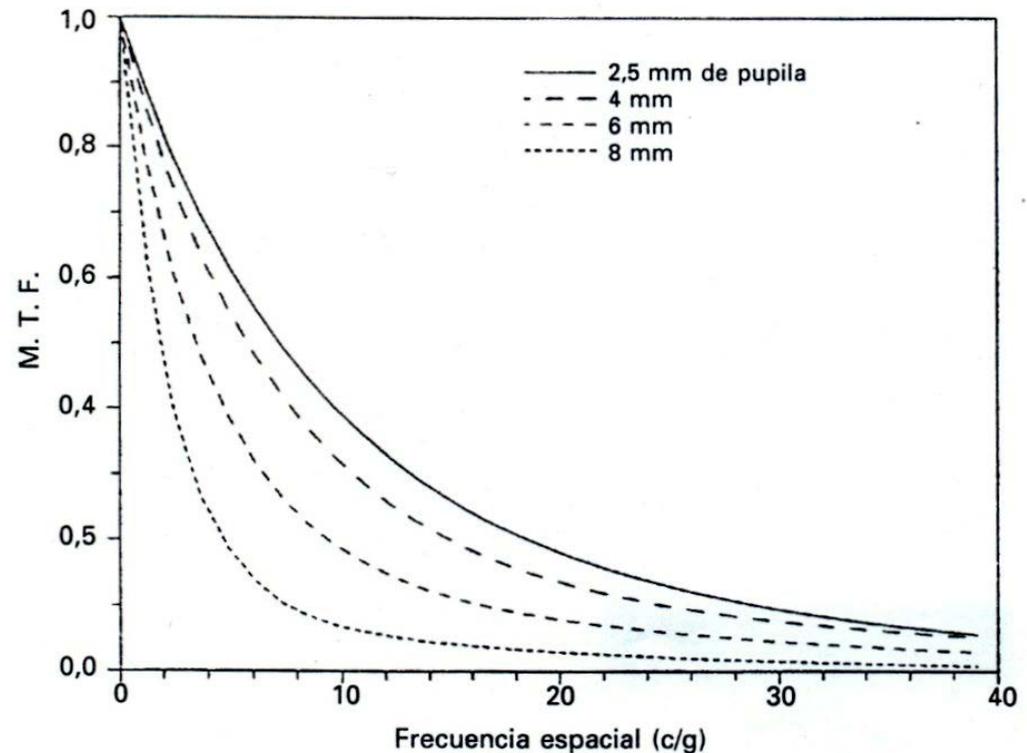
MTF del sistema óptico ocular

En la técnica de doble paso, una fuente puntual se proyecta en la retina y la imagen del punto (después de pasar dos veces el medio ocular) se recoge en la cámara CCD.



MTF del sistema óptico ocular

- A partir de la PSF se puede calcular la MTF mediante el análisis de Fourier.
- El sistema óptico del ojo reduce mucho el contraste de las frecuencias altas pero poco el de las frecuencias bajas.
- La MTF depende del diámetro pupilar, que determina la contribución de las aberraciones.

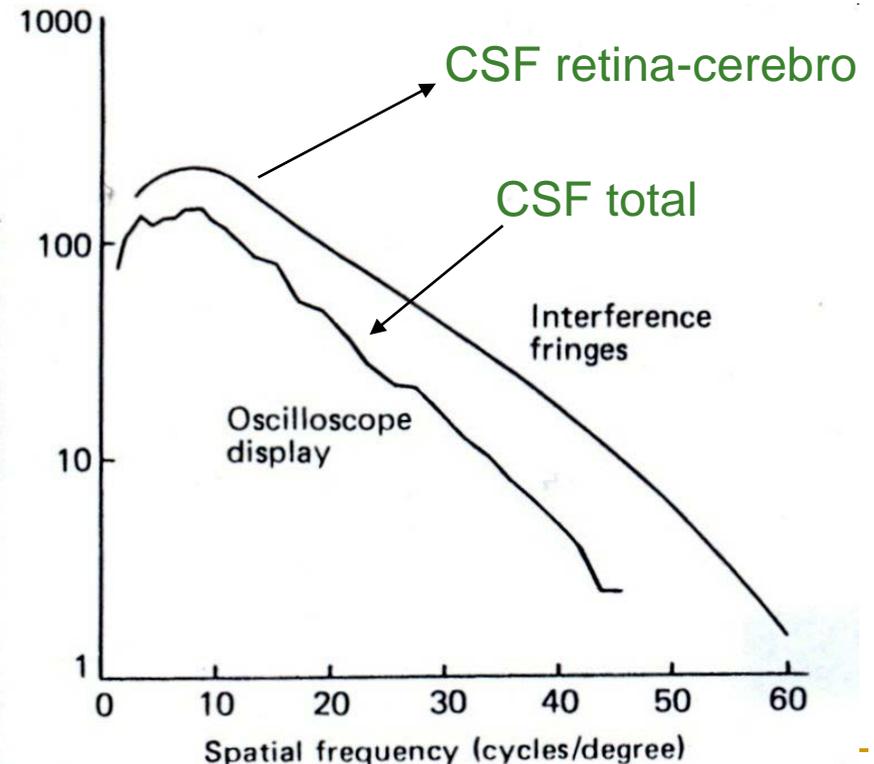


Función de sensibilidad al contraste

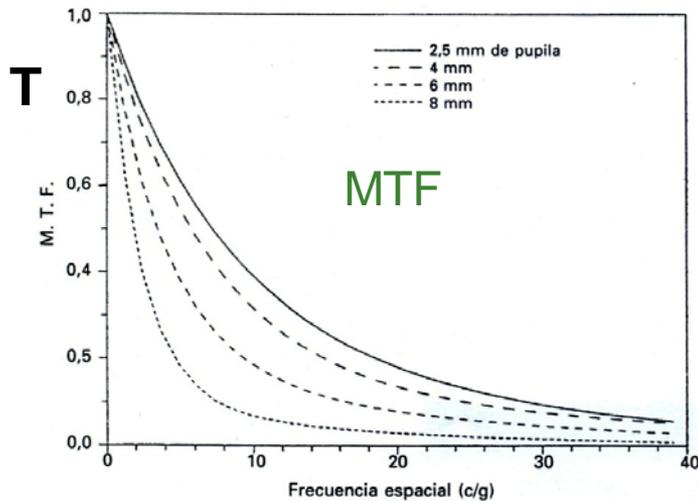
La percepción del contraste está determinada tanto por los componentes ópticos del ojo como por cualquier procesamiento neural en la vía visual:

$$\text{CSF total} = \text{CSF retinocortical} \times \text{MTF óptica ojo}$$

- CSF retinocortical
 - ❑ No contribuye el sistema óptico del ojo
 - ❑ Métodos de medida interferométricos
 - ❑ Filtro espacial de pasa-banda
- MTF del sistema óptico ocular
 - ❑ Filtro espacial de pasa-baja
 - ❑ Método de doble paso



Función de sensibilidad al contraste



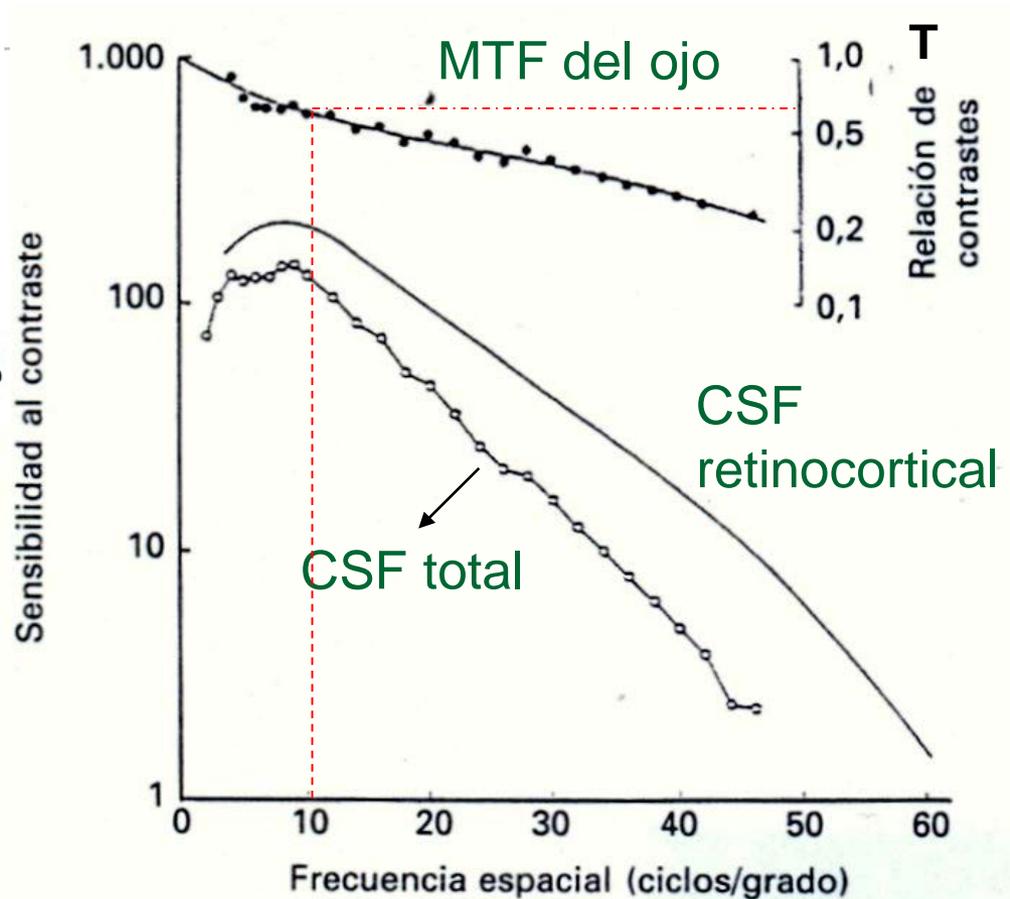
D. pupilar = 2mm

Frecuencia: 10 c/g

SC total = 128

SC retinocortical = 206

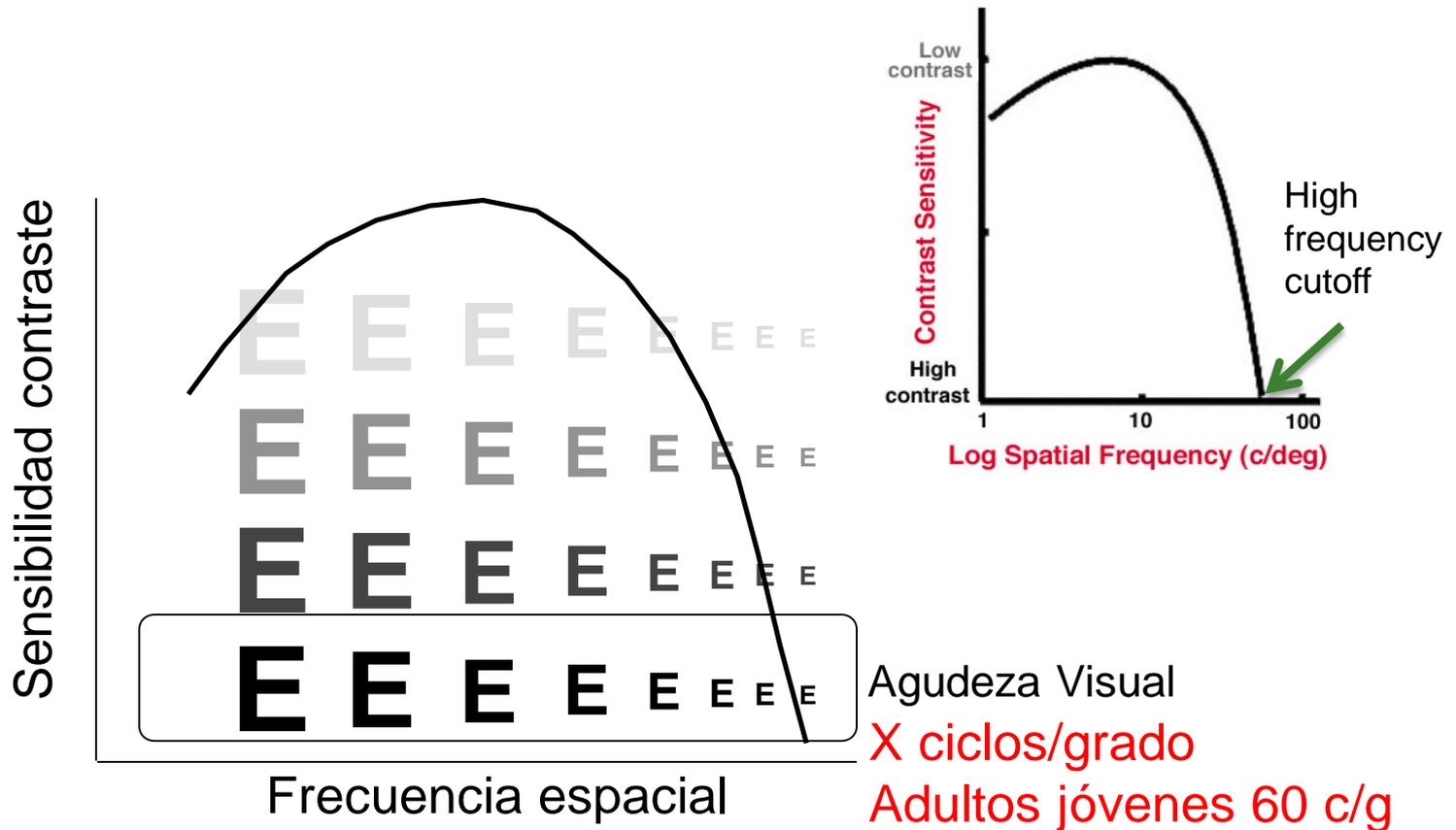
$T = 128/206 = 0,62$



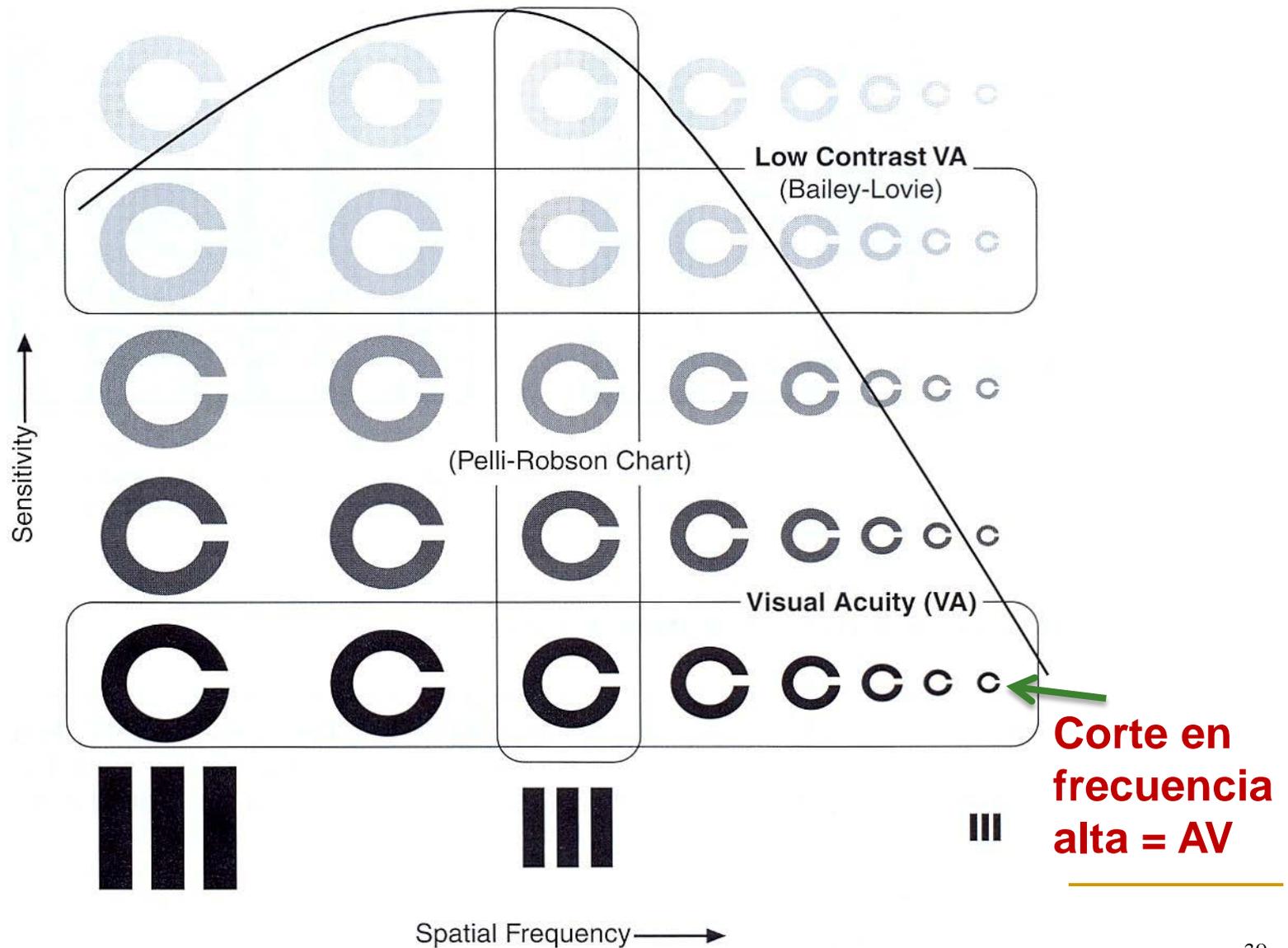
CSF total = CSF retinocortical x MTF óptica del ojo

Relación entre agudeza visual y CSF

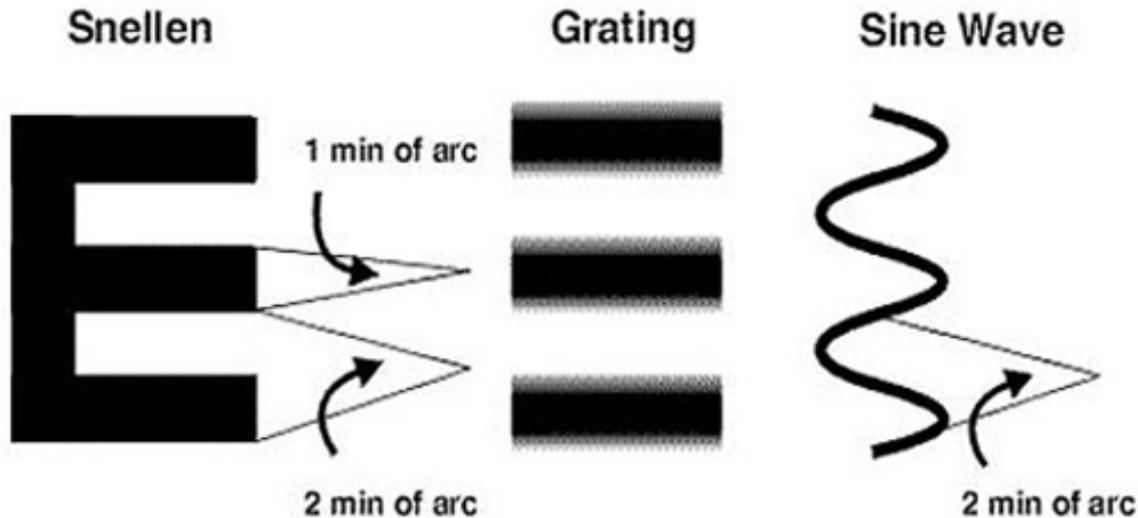
La frecuencia espacial donde la extrapolación de la CSF corta el eje refleja el límite de resolución al 100% de contraste (frecuencia alta equivalente a AV)



Relación entre AV y CSF



Relación entre AV y CSF



2 min de arco en un ciclo \longrightarrow Como en 1 grado hay 60 min

Para AV unidad la frecuencia espacial es 30 c/g \longleftarrow

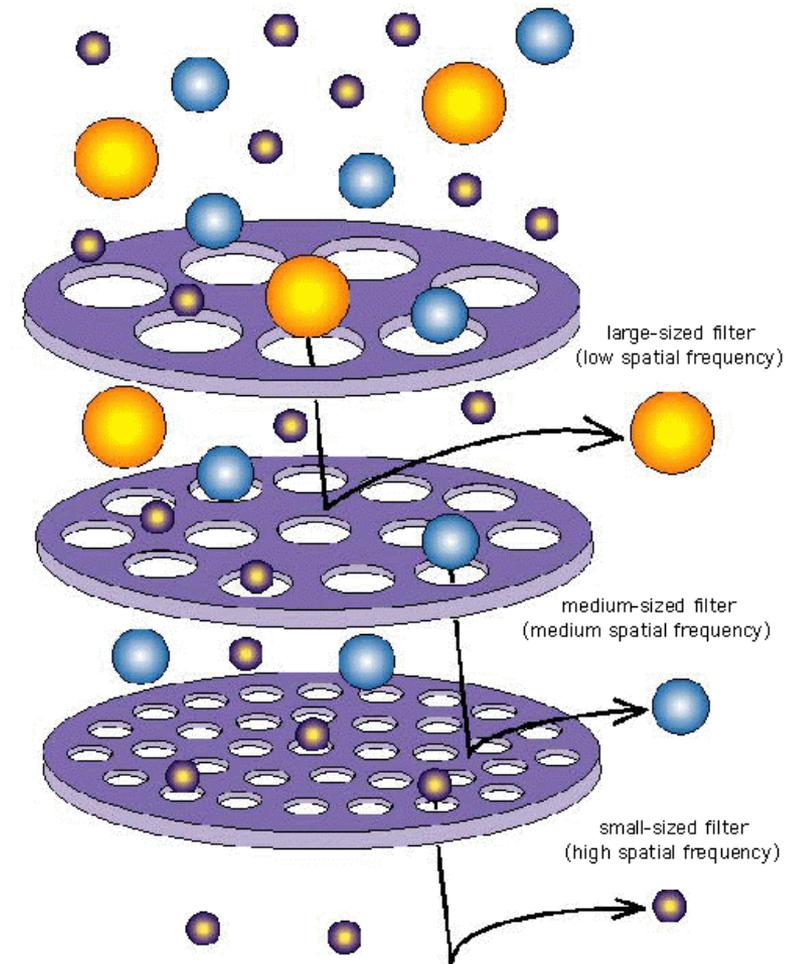
\downarrow
Por tanto, un grado contendrá 30 ciclos

CSF y campos receptores: canales de frecuencia espacial

- En una ubicación dada del campo visual, hay una variedad de tamaños de campos receptivos
- Los **campos receptivos de diferentes tamaños** registran la información de la imagen a **diferentes frecuencias espaciales**:

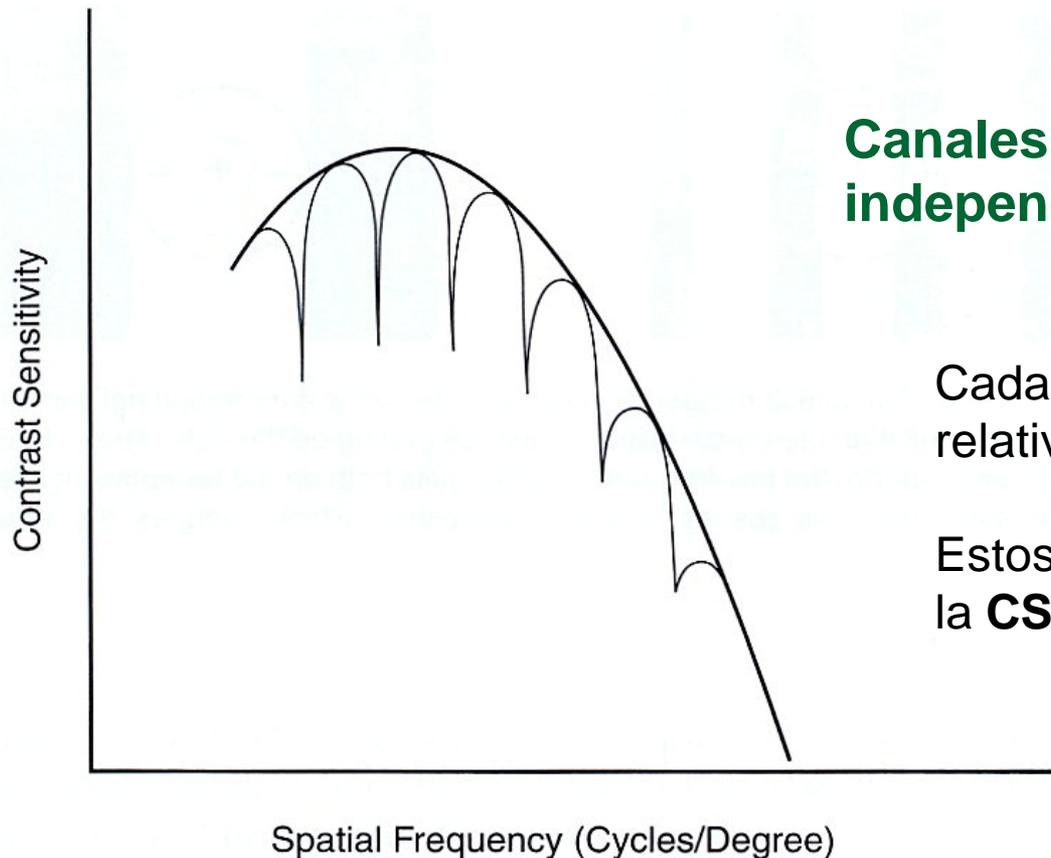
Canales de frecuencia

Physical Model of "Neural" Filters Operating at Different Spatial Scales



Canales de frecuencia espacial

En algunos aspectos del procesamiento de la información visual, el sistema visual se considera como un **analizador de Fourier**



Canales de frecuencia espacial independientes

Cada canal es sensible a un rango relativamente estrecho de frecuencias

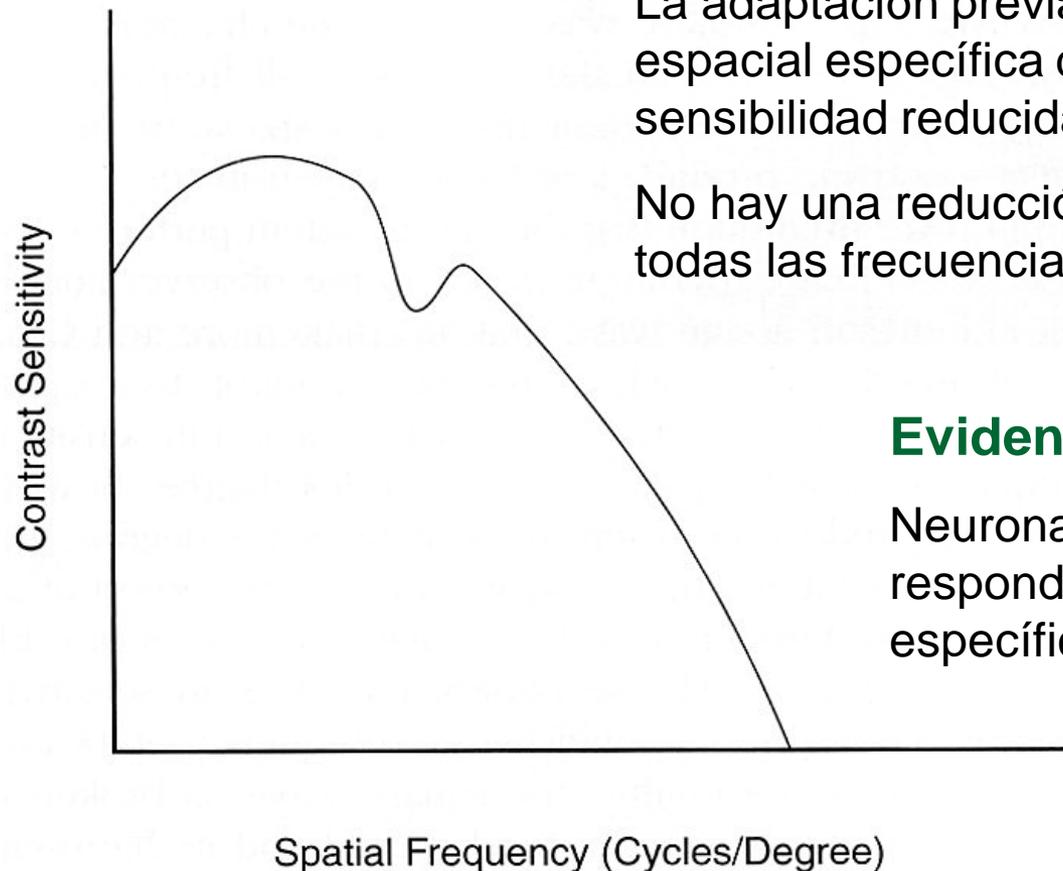
Estos canales se **suman** para generar la **CSF**

Canales de frecuencia espacial

Evidencia experimental

La adaptación previa a una frecuencia espacial específica da como resultado una sensibilidad reducida en esta frecuencia

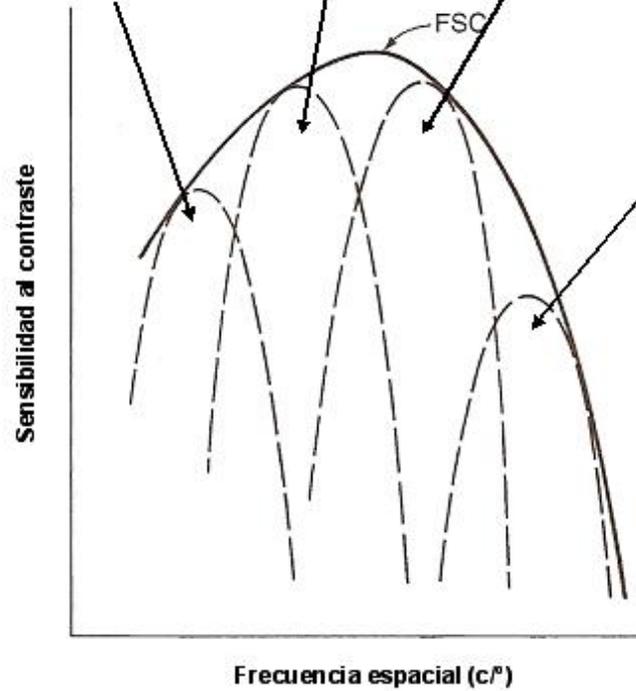
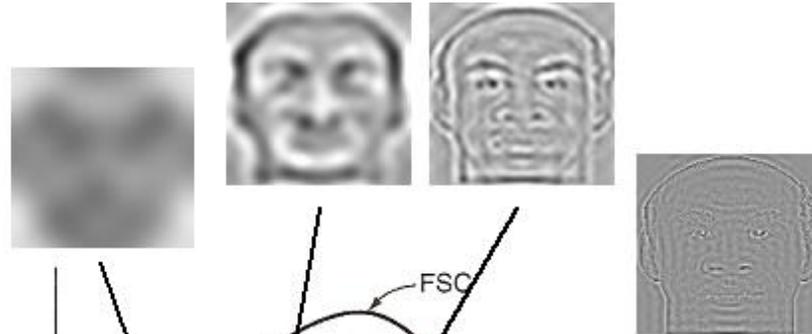
No hay una reducción general en el CSF en todas las frecuencias



Evidencia electrofisiológica

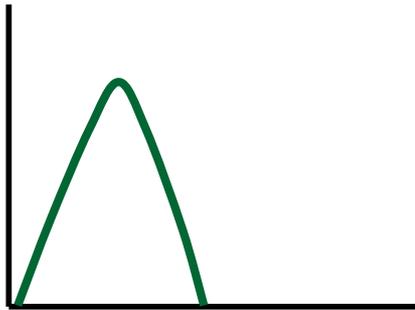
Neuronas Simples del Área Visual 1 responden a frecuencias espaciales específicas

CSF y campos receptores: canales de frecuencia espacial

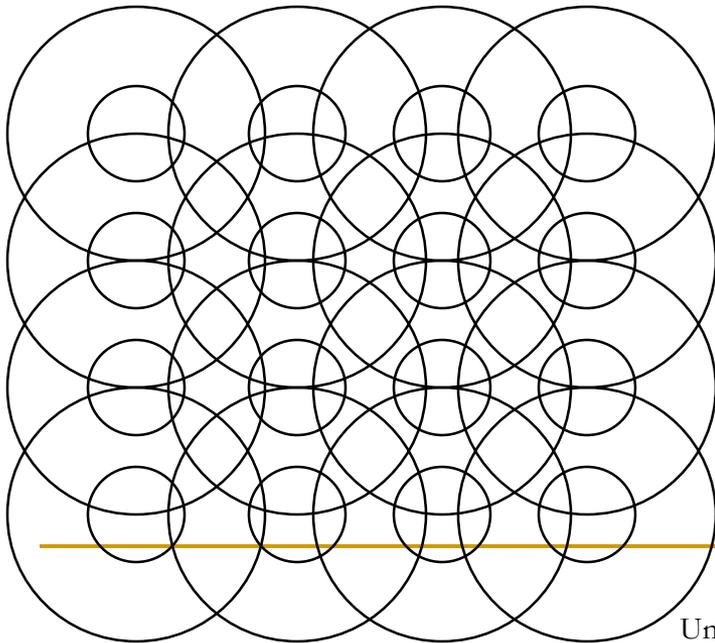


CSF y campos receptores: canales de frecuencia espacial

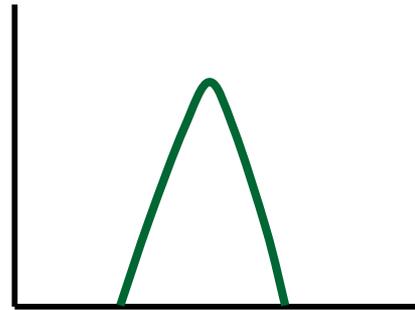
Respuesta



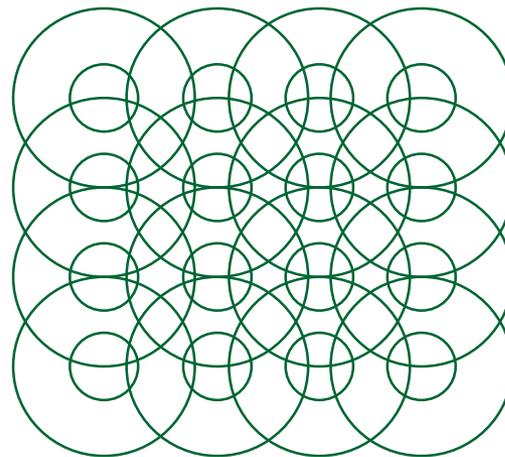
Frecuencia espacial



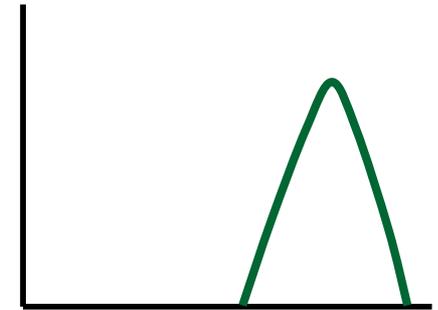
Respuesta



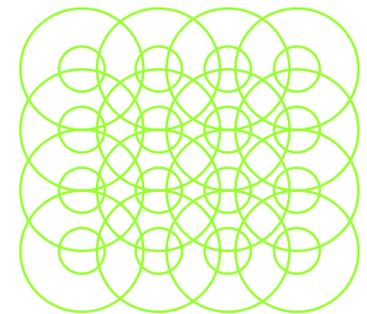
Frecuencia espacial



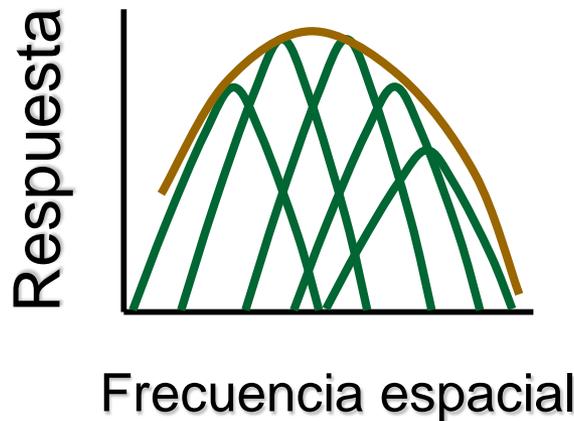
Respuesta



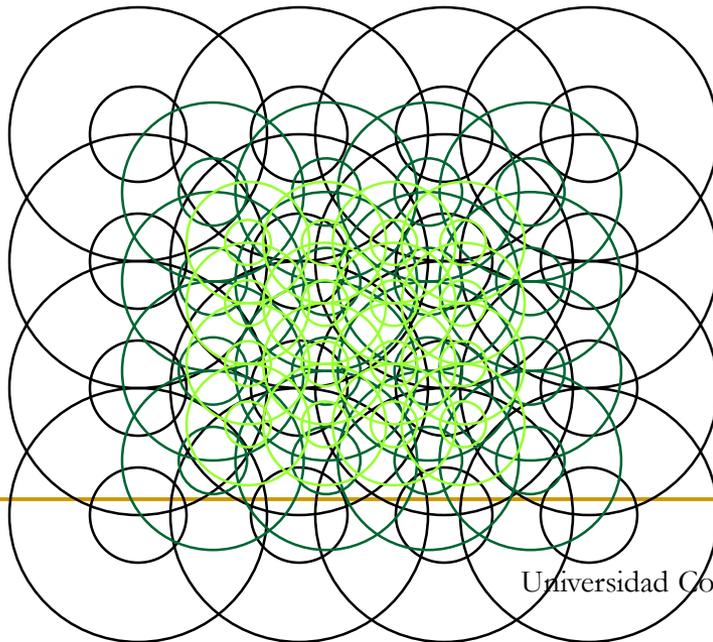
Frecuencia espacial



CSF y campos receptores: canales de frecuencia espacial



La CSF es la envolvente de la respuesta de un conjunto de campos receptores de diferentes tamaños

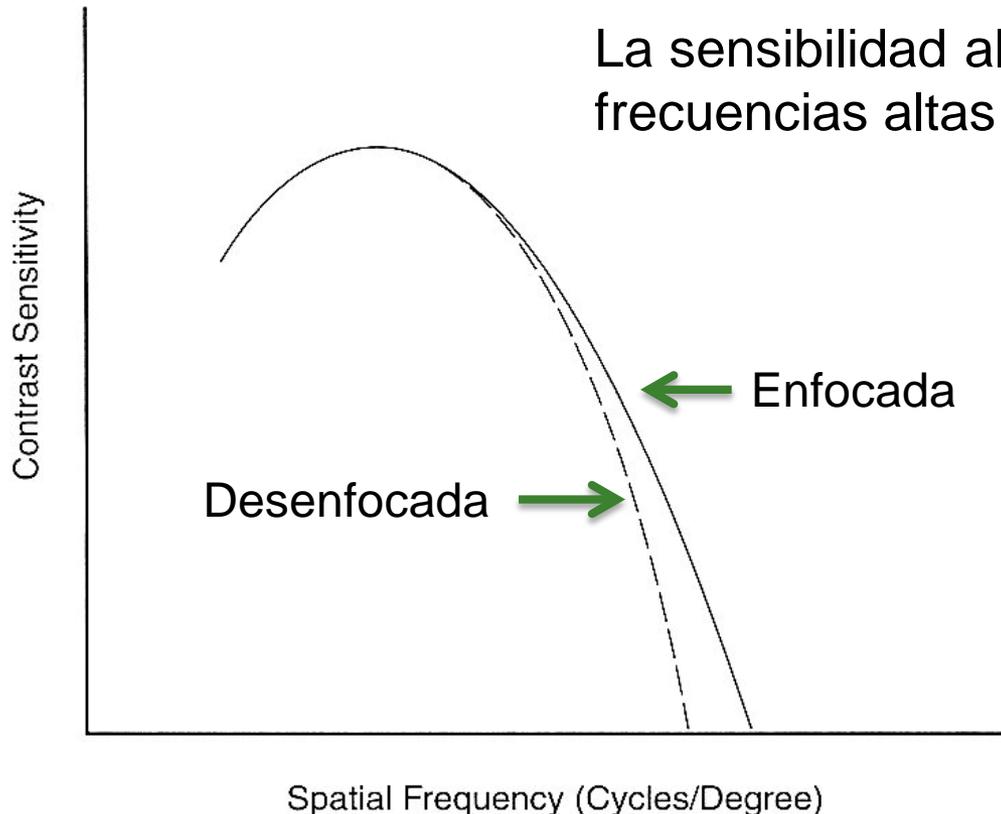


Factores que afectan a la CSF

- Error refractivo o desenfoque
- Luminancia
- Edad
- Patología ocular

Efecto del error refractivo en la CSF

La sensibilidad al contraste disminuye en frecuencias altas debido al desenfoque

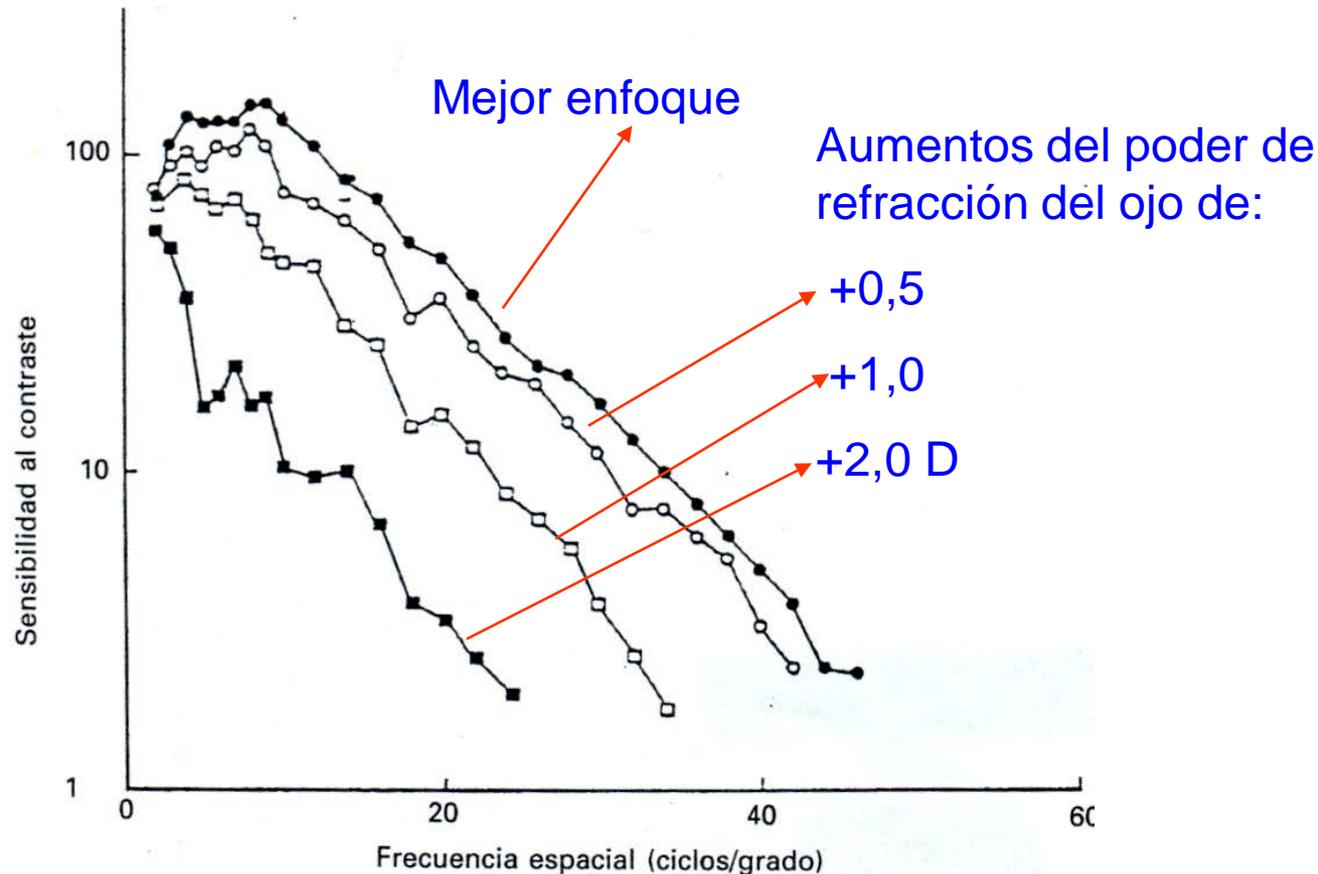


Con desenfoque la tolerancia es mayor para frecuencias espaciales bajas

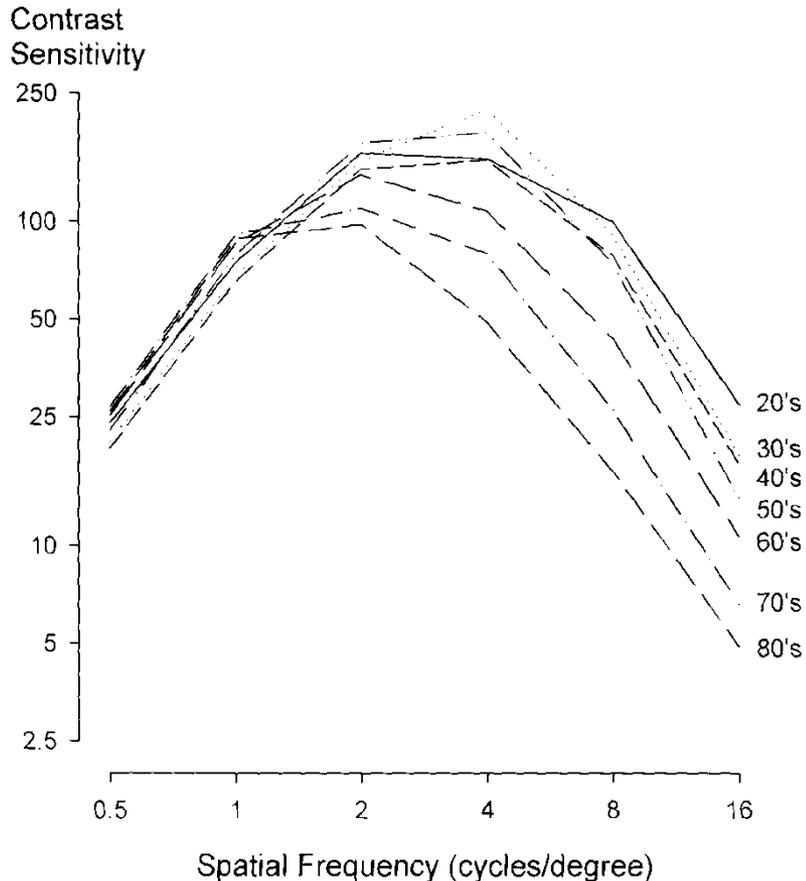
CSF para miopía corregida y sin corregir

Efecto del error refractivo en la CSF

El efecto del desenfoque en la CSF depende de la cantidad de dioptrías fuera de foco y de la frecuencia espacial de la rejilla



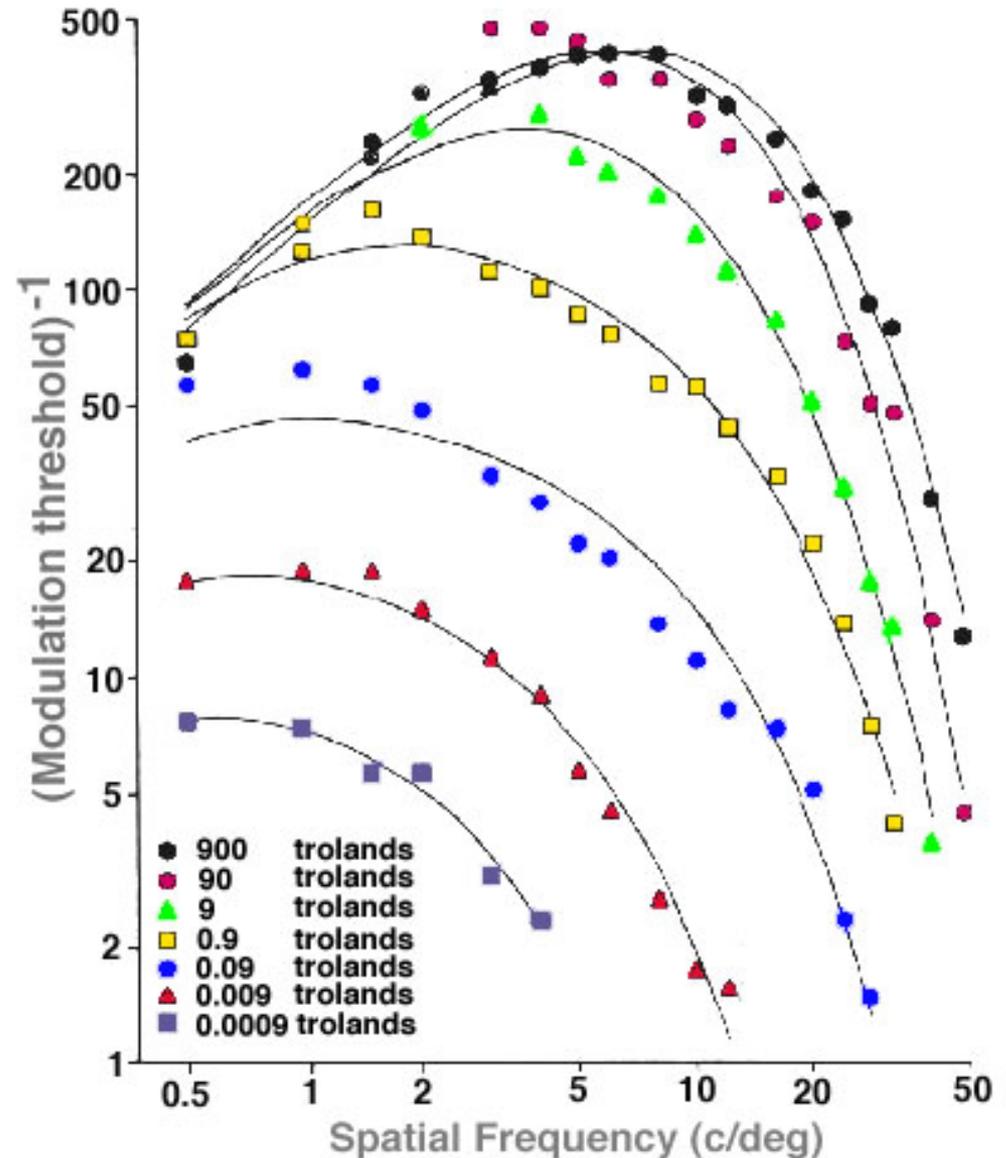
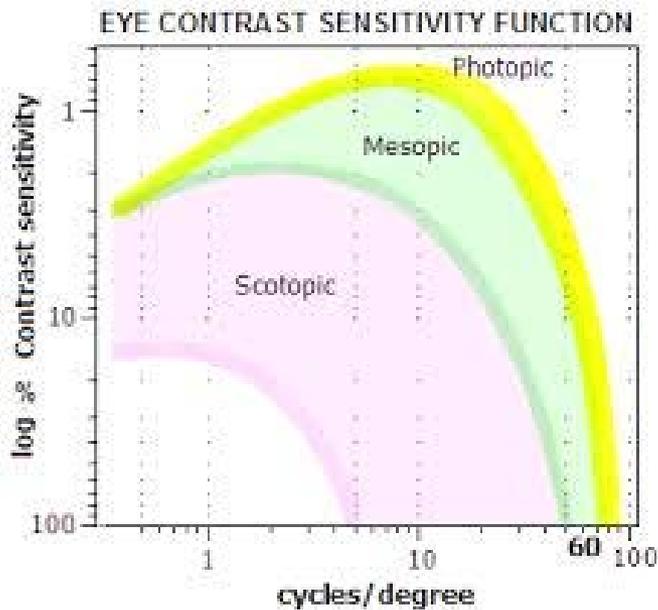
Efecto de la edad en la CSF



Con la edad, disminución de la SC más probable en frecuencias altas e intermedias:

- Menor iluminación retiniana
- Absorción y dispersión de luz

Efecto de la luminancia en la CSF

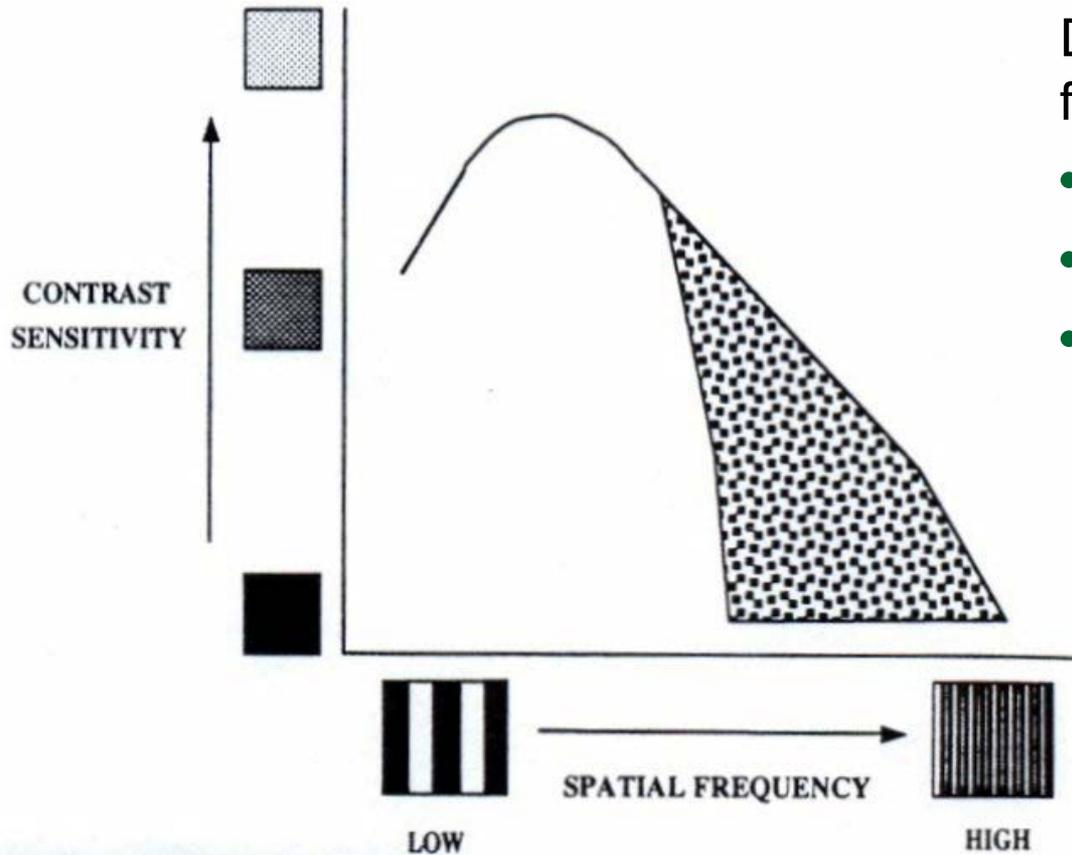


CSF y patología ocular

Pérdidas significativas de SC en determinadas frecuencias espaciales

- DMAE y retinopatía diabética
- Cataratas
- Glaucoma

CSF y patología ocular

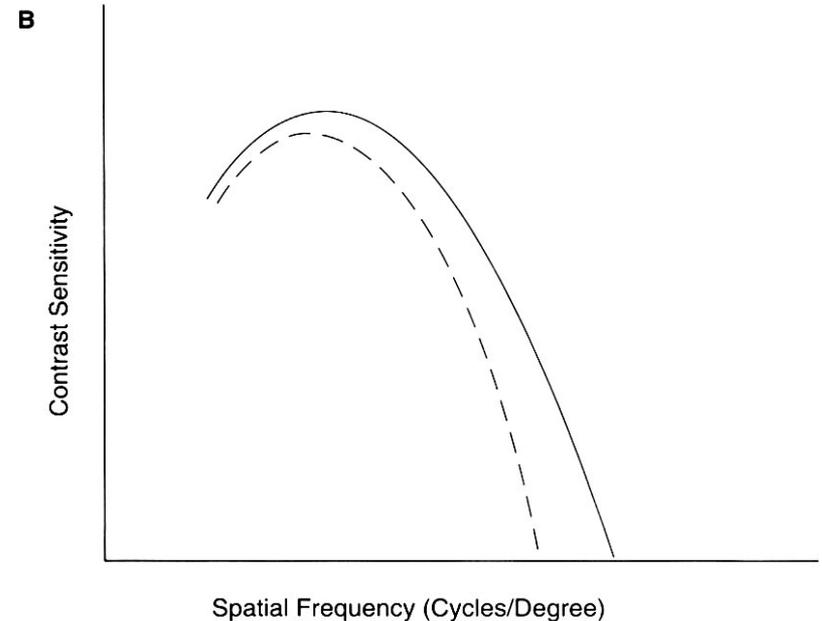
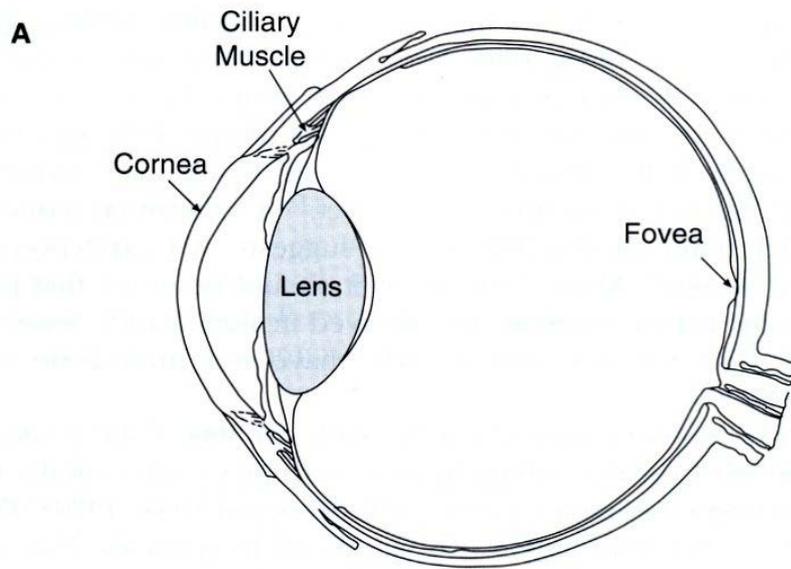


- Disminución de la SC en las frecuencias espaciales altas
- DMAE y retinopatía diabética
 - edema corneal
 - algunos tipos de ambliopía.

CSF y y patología ocular

Cataratas

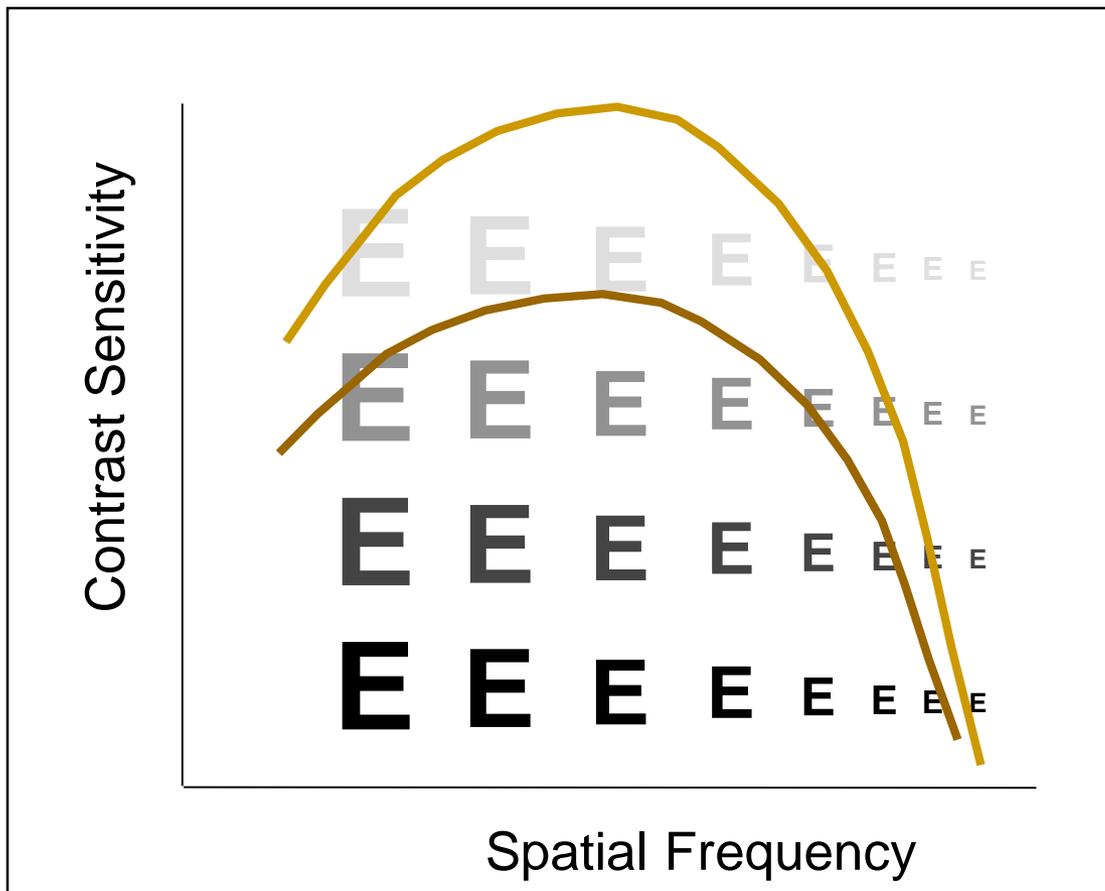
Disminución de la SC en todas las frecuencias espaciales



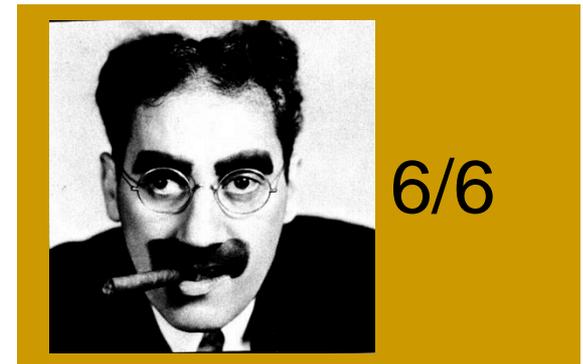
CSF y patología ocular

Glaucoma

Disminución de la SC en las frecuencias bajas



Origen neural





Gracias
