



VNIVERSITAT Æ VALÈNCIA

DEPARTAMENT D'ÒPTICA

## PROYECTO DOCENTE Y DE INVESTIGACIÓN

JESÚS MALO LÓPEZ

JULIO, 2002



## Sobre los Proyectos Docentes

*Su Proyecto Docente es original y brillante. Lástima que la parte original no sea brillante, y la parte brillante no sea original.*

Anónimo  
(atribuido a un miembro de un tribunal de oposición)

*Y si es cuestión de medida  
hijas mías calibrad  
que no siempre van unidas  
cantidad y calidad.*

La Trinca



## Sobre los (buenos) profesores

*Todavía recuerdo con emoción como, en las aulas de esta Universitat, Joan Fuster nos enseñaba a analizar los intrincados versos de Ausiàs March...*

Raimón

*Jamás en la vida habría comprado un libro de poemas de Ausiàs March si no hubiese sido por las cancioncillas de Raimón.*

Anónimo

(atribuido a un miembro del departamento de Óptica)

*Esto es un láser: coto-clonck!*

Ramón Vilaseca

(*coto-clonck* es una onomatopeya que describe el ruido de un láser de He-Ne al caer sobre la mesa del profesor de la clase de Técnicas Experimentales II)

*Jamás en la vida habría hecho una experiencia de cátedra si no hubiese sido por la cacharrería que Ramón traía a clase.*

Anónimo

(atribuido a un miembro del departamento de Óptica)



# Índice General

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Presentación . . . . .	1
1.2	Organización de la memoria . . . . .	1
<b>2</b>	<b>La Percepción Visual: Concepto e Implementación</b>	<b>1</b>
2.1	La Percepción Visual: concepto . . . . .	2
2.2	La Percepción Visual: implementación en la Universitat de València	6
2.2.1	Relación con asignaturas previas . . . . .	7
2.2.2	Relaciones entre las asignaturas del bloque . . . . .	9
2.2.3	Influencia en asignaturas posteriores . . . . .	9
<b>3</b>	<b>La enseñanza de las ciencias en una titulación no científica</b>	<b>15</b>
3.1	La Percepción Visual y tres definiciones (discutibles) de Ciencia .	16
3.2	El problema fundamental . . . . .	18
3.3	Algunos problemas asociados . . . . .	18
3.4	Consecuencias . . . . .	19
3.5	¿Qué opciones nos quedan? . . . . .	19
3.6	Objetivo de este proyecto docente . . . . .	20
3.7	¿Qué pasa si se fracasa en el intento? . . . . .	21
3.8	Nota aclaratoria . . . . .	22
	Referencias . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Metodología Docente</b>	<b>25</b>
4.1	Simplificar el temario . . . . .	26
4.2	Ilustrar los contenidos . . . . .	28
4.3	Computacional en vez de analítico . . . . .	28
4.4	Uso de MATLAB y COLORLAB como material de apoyo . . . . .	29
4.5	Las clases de teoría y de problemas . . . . .	35
4.6	Las sesiones prácticas: laboratorios y aula de informática . . . . .	37
4.7	Las tutorías . . . . .	38
4.8	La evaluación . . . . .	39
4.9	Reflexiones sobre la viabilidad del proyecto . . . . .	41
	Referencias . . . . .	42

<b>5 Programación por Asignaturas</b>	<b>45</b>
5.1 Psicofísica de la Visión . . . . .	47
5.1.1 Cuadro Sinóptico . . . . .	47
5.1.2 Descripción de los bloques temáticos . . . . .	49
5.1.3 Desarrollo de los contenidos (teoría) . . . . .	54
5.1.4 Desarrollo de los contenidos (laboratorio) . . . . .	91
5.2 Colorimetría y Visión del Color . . . . .	96
5.2.1 Cuadro Sinóptico . . . . .	96
5.2.2 Descripción de los bloques temáticos . . . . .	98
5.2.3 Desarrollo de los contenidos (teoría) . . . . .	101
5.2.4 Desarrollo de los contenidos (laboratorio) . . . . .	120
5.3 Percepción Visual . . . . .	126
5.3.1 Cuadro Sinóptico . . . . .	126
5.3.2 Descripción de los bloques temáticos . . . . .	128
5.3.3 Desarrollo de los contenidos (teoría) . . . . .	132
5.3.4 Desarrollo de los contenidos (laboratorio) . . . . .	157
Referencias . . . . .	161
<b>6 Fuentes Bibliográficas</b>	<b>165</b>
6.1 Manuales básicos . . . . .	165
6.2 Manuales complementarios o de uso puntual . . . . .	169
6.2.1 Métodos psicofísicos . . . . .	169
6.2.2 Color . . . . .	170
6.2.3 Aspectos espacio-temporales . . . . .	171
6.2.4 Matemáticas . . . . .	171
6.2.5 Generalidades . . . . .	173
6.3 Internet . . . . .	174
6.3.1 Sitios generales . . . . .	174
6.3.2 Bases de datos . . . . .	175
6.3.3 Páginas de instituciones académicas . . . . .	177
6.3.4 Demos on-line . . . . .	179
<b>7 Proyecto de Investigación</b>	<b>183</b>
7.1 Resumen . . . . .	183
7.2 Limitaciones de las técnicas de representación convencionales (lineales) . . . . .	184
7.3 Alternativas: uso de transformaciones no-lineales de carácter estadístico y perceptual . . . . .	186
7.4 Finalidad del proyecto. . . . .	186
7.4.1 Codificación de vídeo. . . . .	187
7.4.2 Descripción y síntesis de texturas. Restauración de imágenes basada en un modelo de imagen. . . . .	188
7.4.3 Registro de imágenes y estimación robusta de movimiento. . . . .	190
7.5 Trabajo previo . . . . .	191
Referencias . . . . .	191



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Presentación

Con fecha 25 de Octubre de 2001 (B.O.E. n° 276 de 17 de Noviembre de 2001), la Universitat de València convocó Concurso Público para la provisión, entre otras, de una plaza de Titular de Universidad en el área de conocimiento 'Óptica' (plaza número 63/2002), especificando que las actividades docentes a realizar por quien obtenga la plaza se enmarcarán dentro del perfil 'Percepción Visual y Colorimetría'.

De acuerdo con el real decreto 1888/1984, de 26 de Septiembre (B.O.E. de 26 de Octubre de 1984) por el que se regulan los Concursos para la provisión de plazas de los Cuerpos Docentes Universitarios y las modificaciones introducidas por el Real Decreto 1427/1986 de 13 de Junio (B.O.E de 11 de Julio de 1986), los concursantes deben presentar, entre otra documentación, el 'Proyecto Docente que el candidato se propone desarrollar de serle adjudicada la plaza a la que concursa; dicho Proyecto se ajustará, si se hubiera fijado en la convocatoria, a las especificaciones establecidas por la Universidad convocante'.

Atendiendo a la legalidad vigente, esta memoria recoge el Proyecto Docente que sobre la actividad 'Percepción Visual y Colorimetría' presento para concursar a la plaza mencionada anteriormente. Así mismo, expongo un Proyecto Investigador que atiende al mismo perfil.

### 1.2 Organización de la memoria

La memoria está organizada de la siguiente forma:

El segundo capítulo, *La Percepción Visual, Concepto e Impementación en la Universitat de València*, está dedicado a delimitar el cuerpo de conocimientos que, a mi modo de ver, constituye una unidad coherente general a la que me referiré con el nombre de 'Percepción Visual' (no confundir con la asignatura particular del mismo nombre, *Percepción Visual*, a la que me referiré en cursiva).

La coherencia y el carácter básico de este cuerpo de conocimientos justifica la elección del conjunto de asignaturas de nuestro plan de estudios presentadas en este Proyecto Docente: *Psicofísica de la Visión, Colorimetría y Visión del Color*, y *Percepción Visual*.

El objetivo básico de dichas asignaturas es preparar a los alumnos para que entiendan la concepción que se tiene actualmente de la estructura y funcionamiento de las primeras etapas del sistema visual humano.

Por ello, en primer lugar se describirá brevemente el estado del arte de los conocimientos en dicha materia genérica, 'Percepción Visual'. Ese es el referente en el que deberíamos basarnos para elegir los contenidos que deben cubrir las asignaturas mencionadas.

Descrito el concepto genérico de la materia que se pretende abordar, se muestran las relaciones de estos conocimientos con el resto de asignaturas que integran la formación de los estudiantes de la Diplomatura de Óptica de la Universitat de València.

En el tercer capítulo, *Sobre la Enseñanza de las Ciencias en una Titulación (aparentemente) No Científica*, hago una reflexión personal sobre los problemas prácticos que existen para transmitir la materia descrita en el capítulo 2 en el contexto de una Diplomatura de Óptica y Optometría.

Estos problemas prácticos requieren un esfuerzo docente especial, y en ese capítulo se apuntan las soluciones que estimamos convenientes para tratar de llevar a cabo el objetivo básico citado anteriormente: la capacitación para entender la concepción actual del funcionamiento de las primeras etapas del sistema visual.

En el cuarto capítulo, *Metodología Docente*, se ilustran con ejemplos prácticos las soluciones docentes apuntadas en el capítulo 3. En particular nos extendemos sobre los pros y contras del uso de herramientas numéricas para introducir un complemento cuantitativo alternativo a las clases de problemas tradicionales cuando estas no son posibles.

En el quinto capítulo, *Programación por Asignaturas*, se presenta la descripción de los temarios de las asignaturas (tanto su parte teórica como su parte experimental y de ejercicios con ordenador).

En el sexto capítulo, *Fuentes Bibliográficas*, se comenta la bibliografía citada en la exposición de los temas descritos en el capítulo 5.

Por último, en el séptimo capítulo, *Proyecto de Investigación*, incluyo un resumen del proyecto que he solicitado como *coordinador* en la última convocatoria del Ministerio de Ciencia y Tecnología para enfatizar la relación existente entre mi docencia en 'Percepción Visual' y la actividad investigadora que he venido realizando en el pasado y (si es posible!) continuaré realizando en el futuro.

## Capítulo 2

# La Percepción Visual: Concepto e Implementación en la Universitat de València

Cualquier ámbito del conocimiento es difícil de parcelar nítidamente debido a las múltiples aproximaciones y niveles de resolución diferentes que pueden emplearse en el estudio de los fenómenos. De esta manera, en numerosas ocasiones la denominación y los límites de una materia son en cierta medida arbitrarios.

Esto no es una excepción en el caso del estudio de la Visión Humana.

La actividad docente a la que se refiere la convocatoria de la plaza objeto de este concurso es Percepción Visual y Colorimetría. Este nombre tiene una gran semejanza con el de dos asignaturas de la Diplomatura de Óptica de la Universitat de València (*Percepción Visual y Colorimetría y Visión del Color*). No obstante, tomaré este perfil de forma general para incluir además otra asignatura adicional en este Proyecto Docente, *Psicofísica de la Visión*, puesto que entiendo que está íntimamente ligada con las anteriores en el contexto de un cuerpo de conocimientos coherente al que me referiré genéricamente (por abreviar) con el nombre de 'Percepción Visual'.

Este capítulo está dedicado a delimitar el cuerpo de conocimientos que, a mi modo de ver, constituye la materia genérica 'Percepción Visual', y que como veremos incluye de forma natural a la Visión del Color y a la Colorimetría.

**El objetivo básico de las asignaturas referidas es preparar a los alumnos para que entiendan la concepción que se tiene actualmente de la estructura y funcionamiento de las primeras etapas del sistema visual humano.**

Por ello, en primer lugar se describirán brevemente los límites y el estado del arte de los conocimientos en dicha materia genérica, 'Percepción Visual'. Ese es el referente en el que deberíamos basarnos para elegir los contenidos que deben cubrir las asignaturas mencionadas.

Descrito el concepto genérico de la materia que se pretende abordar, a continuación se muestran las relaciones de estos conocimientos con el resto de asignaturas que integran la formación de los estudiantes de la Diplomatura de Óptica de la Universitat de València.

## 2.1 La Percepción Visual: concepto

La comprensión de la Visión Humana es un problema amplio porque, en principio, abarca desde la formación de las imágenes de una escena hasta la elaboración de conceptos sobre la misma.

Este problema se aborda desde diferentes disciplinas que trabajan a diferente nivel de resolución. Por ejemplo, centrándonos en la parte posterior a la fotodetección, tenemos desde la base bioquímica de la neurofisiología, pasando por los modelos simples de las respuestas neuronales relacionados con el procesado de señal, los canales postulados por la psicofísica o mecanismos más abstractos manejados en psicología o en inteligencia artificial.

En el espíritu de los que elaboraron el plan de estudios para la Diplomatura de Óptica había una voluntad de concentrarse en los aspectos ligados a la formación de imágenes, en los algoritmos efectuados por la parte conocida de la fisiología de la visión y en los comportamientos que pueden estudiarse psicofísicamente.

Esta concepción que excluye tanto a aproximaciones de muy bajo nivel como aproximaciones de muy alto nivel tiene su lógica considerando que está dirigida a universitarios cuya misión va a ser la caracterización de la función visual mediante métodos no invasivos para la detección de patologías.

Para definir el concepto por sus límites, 'Percepción Visual' sería el resultado de descartar los aspectos de la Visión Humana relacionados con la formación de imágenes (objeto de la 'Óptica Fisiológica', abordada por varias asignaturas de la titulación) y los relacionados con la descripción anatómica de la fisiología (tratados en *Anatomía y Neurofisiología del Sistema Visual*), y restringir además el estudio a tareas y parámetros perceptuales de bajo nivel de abstracción.

Desde esta perspectiva, 'Percepción Visual' incluye **la medida y descripción de la fenomenología de la percepción de aspectos de bajo nivel de abstracción (la luminosidad, el color, la textura y el movimiento), y la elaboración de modelos que expliquen esa fenomenología en términos de las transformaciones de la señal de los fotodetectores efectuada por las primeras etapas de la fisiología visual.**

Aunque lógicamente la percepción de profundidad podría formar parte de estos aspectos perceptuales de bajo nivel de abstracción, no la he incluido aquí debido a que se trata en las asignaturas *Visión Binocular* y *Anomalías de la Visión Binocular*.

Con esta definición de 'Percepción Visual', es pertinente revisar brevemente cual es la concepción que se tiene actualmente del proceso visual a este nivel de resolución para hacerse una idea del conjunto de conocimientos que debería incluirse en las asignaturas relacionadas.

Los elementos del *modelo estándar* generalmente aceptado son los siguientes [1, 2]:

- Las señales (imágenes) procedentes del mosaico retiniano de fotodetectores con sensibilidades espectrales sintonizadas a largas, medias y cortas longitudes de onda (R,G,B) son analizadas por tres mecanismos abstractos: el canal acromático y los canales cromáticos oponentes rojo-verde (R-G) y amarillo-azul (Y-B) [3, 4].
- Desde el punto de vista espacio-temporal, dichos mecanismos efectúan un cambio de representación de la señal, descomponiendo la imagen retiniana en diferentes imágenes que contienen las componentes de diferentes bandas de frecuencia (escalas y orientaciones) [5, 6, 7, 8]. Específicamente, ejecutan una transformada wavelet de la imagen retiniana con una base que recubre el dominio frecuencial de forma polar dividiéndolo 4 ó 5 escalas hasta 30-40 ciclos por grado, en sectores de anchura frecuencial de una octava y anchura en orientación entre 30 y 40 grados. Este tipo de descomposición se extiende análogamente a la dimensión tiempo [9, 10, 11, 12, 13].
- En primera aproximación el comportamiento de dichos mecanismos es lineal y efectúan una reducción de la anchura de banda global de la señal [14, 15, 16, 17].
- En un segundo estadio, el vector de respuestas procedentes de cada filtro pasa-banda sufre una no-linealidad (sigmoideal) en la que cada componente se normaliza por sus vecinas espaciales en escala y orientación [18, 19, 20, 13].
- A partir de la salida de los filtros pasa-banda espacio-temporal puede calcularse el movimiento 2D en la imagen retiniana [9, 10, 11, 12, 13].
- La resolución en el dominio de respuestas tras la no linealidad es uniforme, luego es no uniforme en el dominio espacial [21, 22, 23, 24].
- La percepción de distorsiones en un determinado patrón resulta de efectuar una sumación de las distorsiones en cada componente sobre las dimensiones espaciales, frecuenciales y cromáticas. Es decir, la distorsión perceptual resulta de calcular distancias mediante el módulo del vector diferencia según una determinada norma que en general no es cuadrática [25, 24, 26].

- Desde el punto de vista cromático, en primera aproximación y considerando estímulos aislados la percepción del color puede tratarse vectorialmente. Las componentes de estos vectores triestímulo pueden verse como la respuesta de tres mecanismos lineales que integran de diferente modo la radiancia espectral procedente de los objetos [27, 4, 1, 2].
- La respuesta lineal de los mecanismos oponentes de integración espectral sufre una no linealidad de tipo saturante y se normaliza por las respuestas de su entorno espacio-temporal dando lugar a una descripción de los estímulos que descuenta el iluminante y depende fuertemente del entorno [2, 28, 29].
- La resolución en el dominio de respuestas tras la no linealidad es uniforme, luego es no uniforme en el dominio triestímulo [2, 30, 31].

Por tanto, la concepción actual que se tiene de estos procesos puede resumirse en el siguiente par de transformaciones (expresiones 2.1 y 2.2).

En lo que respecta a la parte cromática,

$$\rho_\lambda \cdot s_\lambda \xrightarrow{\bar{T}_i(\lambda)} T_i \xrightarrow{CAM} JQhCM \quad (2.1)$$

a partir de la descripción física de los estímulos (reflectancias,  $\rho_\lambda$ , y radiancias  $s_\lambda$ ), el modelo lineal caracterizado por las funciones de igualación del color,  $\bar{T}_i(\lambda)$ , da lugar a la descripción triestímulo,  $T_i$ . A partir de esta descripción de la escena, los modelos de apariencia del color (Color Appearance Models, CAM [2]) incluyen descripciones de la oponencia, la adaptación e inducción cromática y de las no linealidades, obteniéndose los descriptores de la percepción del color para estímulos aislados y relacionados: (según la notación de la CIE) luminosidad, Q, claridad, J, tono, h, colorido, M, y croma, C.

En lo que respecta a la parte espacio-temporal,

$$A \xrightarrow{F} a \xrightarrow{R} r \quad (2.2)$$

cada componente cromática oponente de la respuesta del mosaico de fotodetectores, los vectores  $A$ , se ve sometida a una reducción de su anchura de banda y es analizada por un banco de filtros pasa-banda,  $F$ , que descomponen la señal en bandas de diferente escala y orientación, el vector  $a$  (transformada wavelet de  $A$  según la base del banco de filtros  $F$ ). A partir del vector  $a$  puede caracterizarse la textura y puede obtenerse información sobre el flujo óptico en  $A$ . Después de esta etapa lineal, la salida de cada filtro pasa banda se normaliza por una combinación lineal de las respuestas vecinas teniéndose como resultado una transducción sigmoideal,  $R$ , dependiente del estímulo.

Los dominios de respuestas de los detectores espacio-temporales,  $r$ , y de parámetros dados por los modelos de apariencia del color, son perceptualmente euclídeos, de forma que en los dominios previos (el dominio espacial o el de la transformada,  $F$ , y el espacio triestímulo) los umbrales de discriminación de distorsiones no son esferas, y dependen fuertemente del estímulo de entrada.

Esta concepción tan elaborada del proceso visual es el resultado de análisis empíricos (fisiológicos y psicofísicos) de la respuesta de estos mecanismos [32, 33, 34, 19, 18, 5, 6] y análisis teóricos basados en la organización que deben tomar los detectores para un análisis óptimo de la información contenida en las imágenes naturales. Esta es la llamada *interpretación ecológica* del funcionamiento del sistema visual [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41].

Por tanto, para conseguir que los alumnos estén preparados para comprender esta concepción del proceso visual es necesario que su formación incluya:

- Una descripción básica de la arquitectura de los caminos visuales.
- Un repaso de la fenomenología de la percepción de los aspectos de bajo nivel de abstracción (luminosidad, color, textura y movimiento), incluyendo el comportamiento lineal y las no linealidades básicas relacionadas con la adaptación, la inducción, y el enmascaramiento.
- Un conocimiento de las técnicas psicofísicas que permiten la medida de las respuestas y la determinación y descripción de esa fenomenología. En particular que conozcan la relación entre umbrales incrementales, sensibilidad y respuesta a los estímulos, y la descripción perceptual de estímulos mediante experiencias de igualación simétricas y asimétricas.
- El conocimiento de la tecnología para la medida y generación de estímulos para la realización controlada de experimentos psicofísicos. Fundamentalmente instrumental de medida del color y calibración de dispositivos de reproducción de imágenes.
- Los elementos básicos de la teoría de espacios vectoriales y sistemas lineales, que son fundamentales para caracterizar el comportamiento neurofisiológico [32], el análisis espacio-temporal de la señal hecho por los mecanismos psicofísicos [7], y la colorimetría triestímulo [27]. Sin olvidar (aunque forme parte de la materia 'Óptica Fisiológica') la importancia de los sistemas lineales para caracterizar el comportamiento de la óptica [42].
- Algunos elementos para caracterizar la estadística de las imágenes naturales y la información contenida en las mismas, para entender la aproximación ecológica y comprender el efecto de las transformaciones descritas por los modelos.

**En resumen, el material cubierto por el conjunto de asignaturas dedicado a la 'Percepción Visual' debe incluir la fenomenología de la percepción de la luminosidad, el color, la textura y el movimiento, la metodología psicofísica y la tecnología necesaria para la exploración de dicha fenomenología, y las herramientas matemáticas para la elaboración y comprensión de los modelos que la explican.**

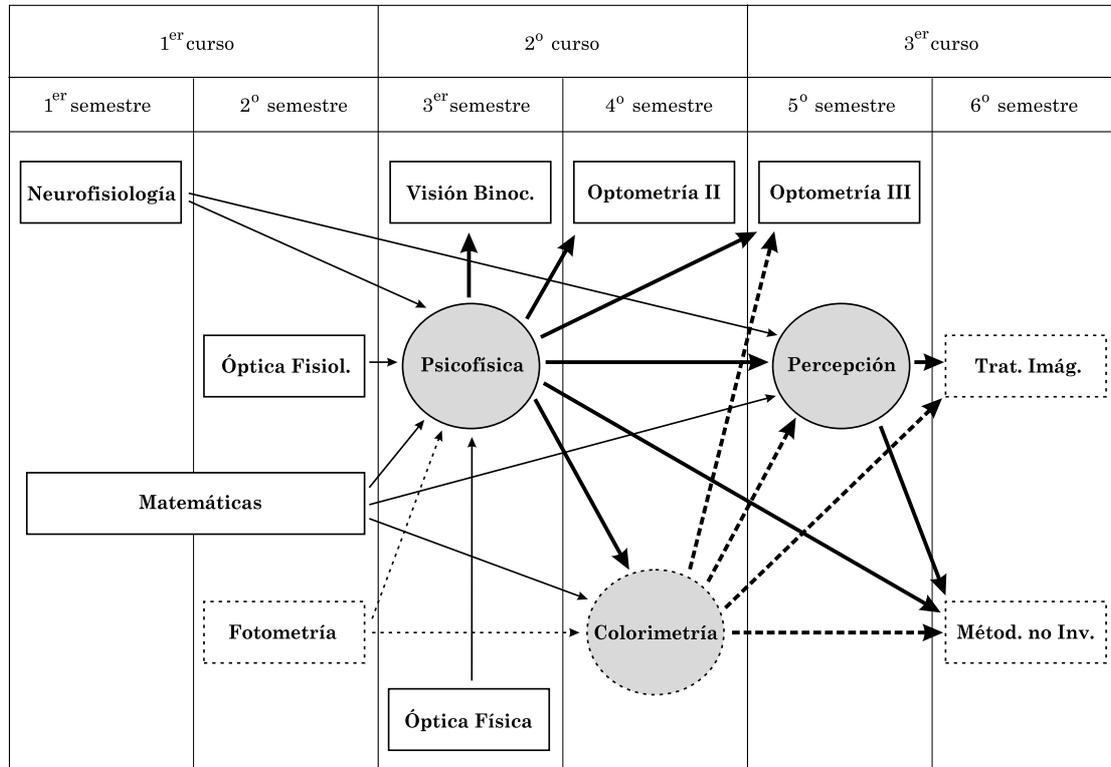


Figura 2.1: Relaciones de las asignaturas de este Proyecto Docente (en círculos grises) con otras asignaturas de la Diplomatura. Las líneas discontinuas indican asignaturas optativas. Las líneas continuas indican asignaturas troncales u obligatorias.

## 2.2 La Percepción Visual: implementación en la Universitat de València

El plan de estudios de Diplomado en Óptica y Optometría vigente en nuestra Universidad fue publicado en el B.O.E. número 239 de 5 de Octubre de 2000.

Para transmitir el material básico citado anteriormente, en este plan de estudios se hace uso de las asignaturas *Psicofísica de la Visión* (troncal de 2<sup>o</sup> curso), *Colorimetría y Visión del Color* (optativa de 2<sup>o</sup> curso), y *Percepción Visual* (troncal de 3<sup>er</sup> curso), que son las que recojo en este Proyecto Docente.

En este apartado se analiza la interacción entre este bloque de asignaturas de carácter básico, y otras asignaturas de la titulación, tanto las que se requieren para abordar este bloque con éxito, como las asignaturas aplicadas que utilizan parte de los conocimientos tratados en este bloque.

Tanto *Psicofísica de la Visión* como *Percepción Visual* están integradas en el conjunto de asignaturas en las que se organiza la materia troncal que en el plan de estudios aparece como 'Estructura y Función del Sistema Visual'. Sin embargo, la asignatura optativa *Colorimetría y Visión del Color*, aun siendo una extensión directa y complemento de las otras dos, aparece como perteneciente a otra materia (optativa): 'Colorimetría y Visión del Color'.

Para centrar ideas, a continuación se enuncian los objetivos de cada asignatura tal como aparecen en el capítulo 5.

- El objetivo de la asignatura *Psicofísica de la Visión* es presentar la fenomenología de la 'Percepción Visual' que se obtiene mediante métodos psicofísicos, así como iniciar al alumno en el uso de dichos métodos.
- El objetivo de la asignatura *Colorimetría y Visión del Color* es doble: (1) presentar al alumno la fenomenología de la percepción del color no cubierta en *Psicofísica* y ejemplos de modelos no-lineales que son casos particulares del paradigma de adaptación/inducción/constancia que se tratará en la asignatura *Percepción Visual*; y (2) reforzar los conocimientos del alumno en fotometría y colorimetría triestímulo, dándole las herramientas para controlar el funcionamiento de dispositivos de generación de estímulos en la experimentación psicofísica.
- El objetivo de la asignatura *Percepción visual* es que el alumno conozca y maneje los conceptos básicos que se emplean en la construcción de modelos cuantitativos de 'Percepción Visual'. En esta asignatura se presentan a nivel introductorio los modelos matemáticos de las primeras etapas del procesamiento de la información visual en el cerebro. Así mismo, se interpretan estos comportamientos como una consecuencia de la adaptación del sistema visual a la naturaleza de las imágenes a las que se enfrenta.

### 2.2.1 Relación con asignaturas previas

- Matemáticas

Como se ve en el esquema (figura 2.1), la asignatura *Matemáticas* (troncal impartida en el primer curso) es necesaria en las tres asignaturas del bloque por diferentes motivos.

En general, tanto en el caso de *Psicofísica* como en el de *Colorimetría*, la presentación de la fenomenología de la 'Percepción Visual' requiere que los estudiantes tengan cierta desenvoltura en el uso del lenguaje matemático (que sepan lo que es una función de varios parámetros, un espacio vectorial o sepan interpretar y expresar comportamientos mediante gráficas...). Los alumnos han adquirido estas competencias generales en *Matemáticas*.

Por otra parte, tanto en el caso de *Colorimetría* como fundamentalmente en el caso de *Percepción Visual* la naturaleza de los modelos presentados es geométrica y estadística, por lo tanto, resultan fundamentales ideas

como los espacios vectoriales, el producto escalar, las transformaciones lineales de cambio de representación (giros), o las funciones densidad de probabilidad.

También sería conveniente que se hubiesen enfrentado a conceptos más específicos como la transformada de Fourier. No obstante, debido a la importancia de este concepto (central en *Psicofísica de la Visión* y en *Percepción Visual*) se presentará en estas asignaturas sin asumir conocimientos previos (véase el apartado relativo a *Óptica Física* en este mismo listado).

Además de conseguir que el alumno adquiriera una cierta destreza en el uso del lenguaje matemático, las sesiones de prácticas de *Matemáticas* ofrecen una introducción a MATLAB que resulta crucial a la hora de poder explotar eficazmente sus potencialidades en *Colorimetría* y en *Percepción*.

- Anatomía y Neurofisiología de la Visión

En *Neurofisiología* los alumnos estudian el funcionamiento básico de las neuronas de los caminos visuales.

Este conocimiento es útil en *Psicofísica* para contrastar la información sobre el proceso visual que puede obtenerse mediante métodos psicofísicos y métodos fisiológicos.

Por otro lado, un conocimiento elemental de las propiedades del LGN y el córtex es interesante para justificar las etapas lineal y no lineal de los modelos presentados en *Percepción*.

- Fotometría Ocular e Iluminación

El estudio de la asignatura optativa *Fotometría Ocular* resulta conveniente, aunque no crucial, para *Psicofísica* y *Colorimetría*.

En el primer caso, porque en *Fotometría* los alumnos se enfrentan por primera vez al problema de describir numéricamente un parámetro perceptual (la luminosidad) a partir de la descripción física del estímulo (la radiancia), solucionando la cuestión mediante el descriptor *luminancia*. Además también se enfrentan por primera vez a un ejemplo de determinación psicofísica de un parámetro perceptual: la función de sensibilidad espectral,  $V_\lambda$ .

En el caso de la *Colorimetría*, el concepto de luminancia ya ha sido también cubierto en *Psicofísica*, sin embargo, resultan interesantes las consideraciones geométricas que intervienen en los problemas de iluminación vistos en *Fotometría* y que resultan claves en situaciones prácticas de medida del color.

- Óptica Fisiológica.

Esta asignatura es un complemento importante del bloque de asignaturas del que nos ocupamos porque el sistema óptico del ojo es el filtro previo

que debe atravesar la información visual antes de que tengan lugar los procesos descritos en este bloque de asignaturas.

Dos detalles que pueden resultar de interés para *Psicofísica* son: (1) en *Óptica Fisiológica* se presenta el concepto de agudeza visual, que en *Psicofísica* se enmarcará en el concepto más amplio de *Función de Sensibilidad al Contraste*, y (2) aunque de forma muy superficial, en esta asignatura se habla del disco de Airy como medida de la calidad de un sistema óptico. Aunque la MTF del sistema óptico se aborda fundamentalmente en *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico*, los comentarios de *Óptica Fisiológica* darán pie en *Psicofísica* para introducir brevemente el concepto de MTF y su relación con la CSF.

- Óptica Física y Óptica Física Aplicada.

En el temario actual de *Óptica Física* (truncal) no se incluyen los conceptos de sistema lineal y caracterización de un sistema óptico en el dominio de Fourier (reservados para *Óptica Física Aplicada*, optativa de tercero).

No obstante, tal situación podría intentar cambiarse debido a que desgraciadamente esta optativa nunca ha llegado a impartirse debido a la escasez de estudiantes. Este es un ejemplo de las dificultades con las que se encuentran las materias cuantitativas en esta titulación (véanse los comentarios sobre esto en el capítulo 3).

### 2.2.2 Relaciones entre las asignaturas del bloque

Las asignaturas del bloque presentado son cursadas secuencialmente por los alumnos. En primer lugar se les presenta la fenomenología básica sobre luminosidad, color, textura y movimiento en *Psicofísica de la Visión*.

Dicha asignatura es fundamental para cursar *Colorimetría y Visión del Color* porque en *Psicofísica* se presenta la teoría triestímulo que es requisito previo para el estudio de modelos avanzados de apariencia del color y las aplicaciones tecnológicas tratadas en *Colorimetría*.

En cuanto a *Percepción Visual*, la *Psicofísica* resulta clave porque el estudio de los modelos presentados en *Percepción* depende del conocimiento previo de la fenomenología de la percepción presentada en *Psicofísica*.

Por otra parte, la *Colorimetría y Visión del Color* resulta útil, aunque no crucial, para *Percepción Visual* por dos motivos: (1) refuerza el concepto de representación de estímulos en un espacio, la medida de distancias entre ellos y pone de manifiesto la insuficiencia de los modelos lineales, y (2) consolida el uso de MATLAB como herramienta para explorar modelos matemáticos.

### 2.2.3 Influencia en asignaturas posteriores

Como se ve en la figura 2.1, el conjunto de asignaturas que constituyen este Proyecto Docente se imparte en el periodo central de la titulación, ya que el conocimiento de la fenomenología de la 'Percepción Visual' resulta básico para

fundamentar el diseño de tests optométricos que vayan más allá de la compensación óptica (fundamentalmente tests de respuesta frecuencial y tests cromáticos) destinados a detectar patologías en los caminos visuales.

Además, las técnicas experimentales descritas en *Psicofísica* van a ser necesarias para la utilización práctica de estos tests. Las técnicas de calibrado y control de los dispositivos de reproducción de imágenes presentadas en *Colorimetría* son una herramienta necesaria para controlar la generación de estímulos.

En concreto, en las asignaturas *Optometría II y III*, y *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico*, se ejercita al alumno en el uso de métodos de diagnóstico de anomalías visuales que tienen su fundamento en el comportamiento del sistema visual presentado en *Psicofísica*, y hacen uso de las técnicas experimentales básicas tratadas en esta asignatura. En *Visión Binocular* (impartida simultáneamente a *Psicofísica*) la fenomenología estudiada hace referencia a la percepción de profundidad, pero en su parte práctica también se hace uso de técnicas psicofísicas básicas de medida de umbrales.

Las asignaturas *Optometría III* y *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico* utilizan diversos test cromáticos para la detección de anomalías visuales. La utilidad de la *Colorimetría* en este caso es doble, por un lado refuerza el contexto teórico de dichos tests (presentado superficialmente en *Psicofísica*) y, por otro lado, proporciona al alumno las herramientas técnicas para la generación de los estímulos cromáticos que sean necesarios en la experimentación. Por otro lado, el trabajo con color en sistemas informáticos a nivel teórico y práctico realizado en *Colorimetría* permite el trabajo con imágenes en color en *Aplicaciones Clínicas del Tratamiento de Imágenes*.

Finalmente, aunque *Percepción Visual* se imparte con posterioridad a la mayoría de las asignaturas donde se utilizan los test en la práctica (excepto en el caso de *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico*), es en esta asignatura donde, tras el conocimiento de los modelos, los alumnos comprenden porque se utilizan ciertos estímulos para caracterizar el funcionamiento del sistema visual.

La situación de *Percepción Visual* en tercero propicia una cierta libertad para experimentar con su contenido (incluyendo conceptos más cuantitativos o teóricos) debido a que la fenomenología básica necesaria para las asignaturas aplicadas ya ha sido cubierta en *Psicofísica* y *Colorimetría*.

El estudio de los sistemas lineales efectuado en *Percepción* resulta fundamental para entender las técnicas de diagnóstico basadas en la medida de funciones de transferencia tratadas en *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico*. Además, el trabajo numérico con imágenes desarrollado en *Percepción* ahorra tiempo en *Métodos* a la hora de abordar la generación de estímulos espaciales por ordenador. Por otra parte, los conceptos de procesado de imágenes introducidos en *Percepción Visual* resultan de gran utilidad para *Aplicaciones Clínicas* porque los alumnos ya se han familiarizado con las imágenes discretas, la transformada de Fourier y el efecto de los filtros espaciales.

# Bibliografía

- [1] B.A. Wandell. *Foundations of Vision*. Sinauer Assoc. Publish., Massachusetts, 1995.
- [2] M.D. Fairchild. *Color Appearance Models*. Addison-Wesley, New York, 1997.
- [3] D. Jameson and L.M. Hurvich. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory: I. chromatic responses and spectral saturation. *Journal of the Optical Society of America*, 45:546–552, 1955.
- [4] R.M. Boynton. *Human Color Vision*. OSA Press, La Jolla, CA, 1992.
- [5] J.G. Daugman. Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles. *Vision Research*, 20:847–856, 1980.
- [6] J.G. Daugman. Spatial visual channels in the fourier plane. *Vision Research*, 24(9):891–910, 1984.
- [7] A.B. Watson. The cortex transform: Rapid computation of simulated neural images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 39:311–327, 1987.
- [8] A.B. Watson and A.J. Ahumada. A hexagonal orthogonal oriented pyramid as a model of image representation in visual cortex. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 36:97–106, 1989.
- [9] A.B. Watson and A.J. Ahumada. Model of human visual motion sensing. *Journal of the Optical Society of America A*, 2:322–342, 1985.
- [10] D.J Heeger. Model for the extraction of image flow. *Journal of the Optical Society of America A*, 4:1455–1471, 1987.
- [11] D.J Heeger. Optical flow using spatiotemporal filters. *International Journal of Computer Vision*, 1:279–302, 1987.
- [12] E.H. Adelson and J.R. Bergen. Spatio-temporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2(2):284–299, 1985.

- [13] D.J. Heeger E.P. Simoncelli. A model of neuronal responses in visual area MT. *Vision Research*, 38:743–761, 1998.
- [14] F.W. Campbell and J.G. Robson. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 197:551–566, 1968.
- [15] D.H. Kelly. Motion and vision II: Stabilized spatiotemporal threshold surface. *Journal of the Optical Society of America*, 69(10):1340–1349, 1979.
- [16] D.H. Kelly. Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds. *Journal of the Optical Society of America A*, 73(6):742–749, 1983.
- [17] K. Mullen. The contrast sensitivity of human color vision to red/green and blue/yellow chromatic gratings. *Journal of Physiology*, 359:381–400, 1985.
- [18] M. Carandini and D. Heeger. Summation and division by neurons in visual cortex. *Science*, 264(5163):1333–6, 1994.
- [19] D. J. Heeger. Normalization of cell responses in cat striate cortex. *Visual Neuroscience*, 9:181–198, 1992.
- [20] A.B. Watson and J.A. Solomon. A model of visual contrast gain control and pattern masking. *Journal of the Optical Society of America A*, 14:2379–2391, 1997.
- [21] A.B. Watson. Efficiency of a model human image code. *Journal of Optical Society of America A*, 4(12):2401–2417, 1987.
- [22] H.R. Wilson, D. Levi, L. Maffei, J. Rovamo, and R. DeValois. The perception of form. In L. Spillmann and J.S Werner, editors, *Visual Perception: The Neurophysiological Foundations*, pages 231–272, San Diego, 1990. Academic Press.
- [23] H.R. Wilson. Pattern discrimination, visual filters and spatial sampling irregularities. In M.S. Landy and J.A. Movshon, editors, *Computational Models of Visual Processing*, pages 153–168, Massachusetts, 1991. MIT Press.
- [24] P.C. Teo and D.J. Heeger. Perceptual image distortion. *Proceedings of the SPIE*, 2179:127–139, 1994.
- [25] K.R. Boff, L. Kaufman, and J.P. Thomas. *Handbook of Perception and Human Performance*. John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [26] A.B. Watson. *Digital Images and Human Vision*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [27] G. Wyszecki and W.S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. John Wiley & Sons, New York, 1982.

- [28] L. Guth. Model for color vision and light adaptation. *Journal of the Optical Society of America A*, 8:976–993, 1991.
- [29] R.W.G. Hunt. *The Reproduction of Colour*. Fountain Press, London, 1995.
- [30] D.L. MacAdam. Specification of small chromaticity differences. *Journal of the Optical Society of America*, 33.
- [31] E. Shrodinger. Grundlinien einer theorie der farbenmetrik im tagessehen. *Ann. Physik*, 63:481–495, 1920.
- [32] C. Enroth-Cugell and J.G. Robson. The contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat. *Journal of Physiology*, 187:517–522, 1966.
- [33] C. Enroth-Cugell and L.H. Pinto. Algebraic summation of centre and surround inputs to retinal ganglion cells of the cat. *Nature*, 226:458–459, 1970.
- [34] S. Marcelja. Mathematical description of the response of simple cortical cells. *Journal of the Optical Society of America*, 70(11):1297–1300, 1980.
- [35] Barlow HB. Possible principles underlying the transformation of sensory messages. In WA Rosenblith, editor, *Sensory Communication*, pages 217–234. MIT Press, Cambridge, MA, 1961.
- [36] D. Field. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(12):2379–2394, 1987.
- [37] B.A. Olshausen and D. Field. Emergence of simple-cell receptive field properties by a learning a sparse code for natural images. *Nature*, 381:607–609, 1996.
- [38] A.J. Bell and T.J. Sejnowski. The independent components of natural scenes are edge filters. *Vision Res.*, 37(23):3327–3338, 1997.
- [39] B.O. Olshausen E.P. Simoncelli. Natural image statistics and neural representation. *Annu. Rev. Neurosci.*, 24:1193–1216, 2001.
- [40] O. Schwartz and E. P. Simoncelli. Natural signal statistics and sensory gain control. *Nature Neuroscience*, 4(8):819–825, 2001.
- [41] F. Rieke, D. Warland, R. R. de Ruyter van Stevenink, and W. Bialek. *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press, 1996.
- [42] J. Santamaría, P. Artal, and J. Bescós. Determination of the point spread function of human eyes using a hybrid optical-digital method. *Journal of the Optical Society of America A*, 4:1109–1114, 1987.



## Capítulo 3

# Sobre la enseñanza de las ciencias en una titulación (aparentemente) no científica

La cuestión que tratamos aquí es la de la enseñanza de la materia 'Percepción Visual' (tal como se expuso en el capítulo anterior: como una disciplina de carácter cuantitativo, con una cierta elaboración matemática) en la Diplomatura de Óptica y Optometría de la Universitat de València.

Esta concepción de la materia y este contexto hacen que dicha cuestión tenga una serie de matices *problemáticos* (que requieren un esfuerzo docente especial). A continuación expongo en que consisten estos problemas específicos y como estamos intentando atacarlos (varios miembros de este Departamento).

### 3.1 La Percepción Visual y tres definiciones (discutibles) de Ciencia

La primera cuestión a tratar es la de si la 'Percepción Visual' (una parte de las Ciencias de la Visión) es, o no, una disciplina científica.

En cierta ocasión, un colega al que respeto mucho<sup>1</sup> me dió una definición humorística de *ciencia* que él tomaba muy en serio (y a mi me dejó bastante afectado por un tiempo):

*Las disciplinas en cuyo nombre se incluye la palabra ciencia, no son ciencias.*

Naturalmente, lo que él quería decir es que, mientras que las siguientes disciplinas:

- Matemáticas
- Física
- Química
- Biología computacional
- Metafísica

debían considerarse como *ciencias*, estas otras disciplinas:

- Ciencias Ocultas
- Ciencias de la Información (Periodismo)
- Ciencias Sociales
- Ciencias de la Salud
- Ciencias de la Visión
- Ciencias de la Computación

no merecían tal categoría.

Es el problema de las afirmaciones humorísticas: son fácilmente rebatibles. En mi opinión, Philippe se equivocaba (como mínimo en los dos últimos casos).

Si tomamos otra definición de ciencia igual de genérica pero menos divertida (es decir, que genera más consenso), podríamos decir que:

*En un sentido estricto las disciplinas científicas son aquellas que elaboran modelos matemáticos (predictivos y por tanto, contrastables) de los fenómenos que ocurren.*

Esta definición (no exenta de polémica) me gusta porque elimina los ejemplos *incómodos* de la lista expuesta anteriormente. Más aún, esta definición puede reducirse, sin pérdida de generalidad, a otra más precisa (y por tanto muy apropiada para un auditorio de físicos y matemáticos):

---

<sup>1</sup>Philippe Refregier, Professeur de la Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille.

*Ciencia es todo aquello en lo que trabaje un número suficiente de físicos y matemáticos. Y lo que no cumpla dicha condición, no es ciencia.*

Dado el escaso acuerdo que parece haber entre los filósofos de la ciencia sobre la definición<sup>2</sup>, yo estoy tentado de quedarme con la última.

Aparte de las obvias razones gremiales, la última definición me gusta porque da una explicación trascendente al hecho de que algunos insignes físicos y matemáticos se hayan interesado por materias (como las Ciencias de la Visión o las de la Computación) que me resultan interesantes<sup>3</sup>.

En resumen, las discutibles ideas que quería transmitir en este apartado son tres:

- Indudablemente la 'Percepción Visual' es una disciplina de *ciencias* en el sentido de que utiliza modelos matemáticos elaborados para explicar la fenomenología de fenómenos naturales, y por ello contiene múltiples aspectos de interés para una persona con formación en física o matemáticas.
- Debido a mi formación de físico y a los (buenos o malos) prejuicios asociados a ella, considero que los aspectos relacionados con la elaboración de modelos matemáticos de la percepción son los que le dan a esta disciplina un carácter *netamente* científico (y por tanto útil para la formación integral del alumno): sin estos aspectos cuantitativos, entiendo que no se describe adecuadamente la fenomenología, ni se cuenta con herramientas para hacer predicciones que sea posible contrastar experimentalmente.
- Por ello, creo que los estudiantes de 'Percepción Visual' deberían dedicar algún tiempo (mucho o poco) a estos aspectos. O, cuando menos, dichos aspectos no deberían ser ocultados totalmente en la exposición de la materia.

A pesar de lo centrales que resultan estas tres ideas para sustentar la orientación de este Proyecto Docente, soy consciente de que los argumentos esgrimidos no son de peso para el que no estuviese convencido de antemano.

Como dirían dos autores al uso (p.e. Popper [11] y Khun [12]), estos párrafos no constituyen ningún tipo de argumentación: no sólo han sido completamente arbitrarios y cargados de reprobables argumentos de *autoridad* sino que además están totalmente influenciados por el *paradigma* actual (es decir los prejuicios debidos a mi formación).

---

<sup>2</sup>Sobre todo entre aquellos filósofos de la ciencia que son físicos o matemáticos [1].

<sup>3</sup>Siempre es bonito pensar que, aunque sea de ciencias *menores*, a uno le interesan los mismos problemas que a, por ejemplo, Newton (Primeras teorías -incorrectas- sobre el Color [2]), Gabor (Teoría de la Información [3]), Shannon (Teoría de la Información [4]), Wiener (Cibernética: Biología + Teoría de la Información [5]), Schrödinger (Métricas no euclídeas de espacios cromáticos [6]), Von Neumann (arquitecturas para el procesado de la información [7]), Feynman (reconoció la percepción como un ingente problema no resuelto [8]), Watson y Ahumada (propusieron las wavelets como representación usada por el córtex visual [9]) o Simoncelli (interesado en la relación entre la estadística de las imágenes naturales y la organización del córtex [10]).

Por lo menos, para otro autor al uso (Feyerabend, partidario de la *proliferación* como método [13]), esta inconsistencia quizá no sea un problema grave si al final algún estudiante acaba aprendiendo algo distinto de cero.

## 3.2 El problema fundamental

En mi opinión, el problema fundamental de la orientación cuantitativa propuesta aquí es que *dicha concepción cuantitativo-formal es minoritaria entre la comunidad de investigadores que se dedica al estudio de la 'Percepción Visual'*.

A nivel mundial dicha comunidad está fundamentalmente integrada por psicólogos y en mucha menor medida por optometristas (o gente con otra formación: físicos, matemáticos, ingenieros, neurofisiólogos, etc.).

Como ocurre en otras áreas multidisciplinares (como en Ciencias de la Computación) la aproximación propuesta por físicos o matemáticos está fuera de la corriente principal de esas áreas, en cierto modo, dirigidas por gente con otra formación.

Este hecho, aparentemente alejado del fenómeno docente, lleva asociados varios problemas que dificultan la docencia de esta materia.

## 3.3 Algunos problemas asociados

Los problemas de que esta concepción sea minoritaria son de dos tipos:

- La imagen que la sociedad tiene de esta materia (y de la titulación) no incluye los aspectos matemático-formales que la materia tiene en realidad. Esto genera dos problemas:
  - Los alumnos rechazan esos contenidos porque no coinciden con sus expectativas.
  - Los profesores exigen un nivel inferior a dichos alumnos porque no se espera que ellos lleguen a tal nivel.
- El profesor que pretende plantear de esta forma la materia normalmente ha cursado unos estudios diferentes que los alumnos a los que se dirige. Por tanto, aunque esté convencido de la oportunidad de la aproximación propuesta, y esté dispuesto a dar un cierto (mucho o poco) nivel a los alumnos, se encuentra con el problema docente de que no conoce las claves de razonamiento que puedan interesar a estos estudiantes.

Por ejemplo, mientras que un físico explicando 'Percepción Visual' en la titulación de Física<sup>4</sup> no tendrá problemas graves para motivar a sus alumnos debido a que conoce cuáles son los aspectos que pueden motivarles, la situación se le complica mucho en el contexto de la Diplomatura de Óptica, porque no conoce de antemano los elementos que pueden motivar

---

<sup>4</sup>Por ejemplo en la asignatura de Física de la Visión impartida por este Departamento.

a estos alumnos para enfrentarse (y superar) un lenguaje que les resulta extraño.

Naturalmente, como se puede imaginar, estos problemas no son exclusivos de la 'Percepción Visual', sino que afectan de lleno a todas las materias de la titulación que cuentan con una cierta componente cuantitativa (de ciencias!).

### 3.4 Consecuencias

Estos problemas citados tienen dos consecuencias inmediatas:

- Si se intenta dar un cierto nivel sin hacer un cierto esfuerzo docente especial (asumiendo ingenuamente que estos alumnos piensan como físicos) el resultado es *catastrófico*.
- Si se renuncia a que los alumnos dominen (al menos en un grado mínimo) la parte cuantitativa de la materia se corre el riesgo de *desnaturalizar* la materia en cierta medida.

En este caso, nos quedaríamos en una simple descripción de la fenomenología y en la mera exposición de técnicas que los alumnos aprenderían memorísticamente sin ser conscientes en absoluto de la potencia que tienen los resultados que están memorizando.

### 3.5 ¿Qué opciones nos quedan?

Así las cosas (*catástrofe o desnaturalización*), parece que, descartado el suicidio, sólo quedan dos opciones:

- Opción arriesgada: tratar de evitar la *catástrofe*.  
Creemos que la clave para dar un cierto nivel sin que ocurra una catástrofe, estaría centrada en tres puntos:
  - *Simplificar*: tratar reducir el temario al máximo.  
Si nos centramos sólo en los conceptos básicos (abstractos pero potentes), quizá tengamos tiempo suficiente para que los alumnos superen la dificultad debida al lenguaje matemático y lleguen a captar la esencia de los modelos.
  - *Ilustrar* las expresiones o modelos matemáticos mediante ejemplos.  
De esta forma ayudaremos a que los alumnos superen la barrera que les supone el lenguaje matemático.
  - *Computacional en vez de analítico*.  
En lugar de poner el énfasis en que los alumnos dominen una determinada técnica matemática de forma analítica<sup>5</sup>, convendría poner el

---

<sup>5</sup>Por ejemplo la solución de transformadas de Fourier.

énfasis en que los alumnos fuesen capaces de usar alguna herramienta de software para resolver ese problema<sup>6</sup>.

Si se consiguiera que los alumnos adquirieran cierta desenvoltura en el uso de una herramienta como MATLAB, serían capaces de explorar por si mismos el comportamiento de los modelos aplicándolos a diferentes casos concretos.

La idea es poner en manos de los alumnos un instrumento que les permita *ilustrar* por si mismos los conceptos matemáticos con los que tienen dificultades analíticas.

- Opción conservadora: aceptar la *desnaturalización*.

La opción más sencilla (y desde luego la más cómoda para el profesor y los alumnos) consiste en que el profesor *simplifique* el temario, *ilustre* con transparencias los conceptos matemáticos, y finalmente (*en el examen*) no exija que los alumnos razonen, sino que se limiten a *desembuchar* conceptos matemáticos como si se tratase de un manual de histología del sistema visual.

Quisiera hacer hincapié de nuevo en la comodidad de la opción conservadora: el profesor no debe preocuparse de cómo hacer que los alumnos *hagan cuentas* (en el mejor de los casos sólo es él quien debe utilizar el software -o la fotocopidora- para generar los ejemplos ilustrativos) y los alumnos deben estudiar la asignatura de forma puramente memorística.

La opción conservadora garantiza además un nivel de aprobados razonable, cosa que siempre es deseable, especialmente si se trata de una asignatura *optativa* en un contexto competitivo en el que los alumnos lógicamente están preocupados por seleccionar un conjunto de asignaturas *fáciles* para completar el número de créditos necesario que les dará el ansiado título<sup>7</sup>.

### 3.6 Objetivo de este proyecto docente

Naturalmente, el objetivo es intentar abordar la opción arriesgada.

Para ello, la Dra. María José Luque y yo mismo hemos desarrollado herramientas (COLORLAB y otros programas en MATLAB) que posibilitan el planteamiento de un complemento cuantitativo a las sesiones de teoría. Además de su uso en nuestras prácticas (sesiones de problemas en aula de informática), hemos propiciado el uso de MATLAB en las sesiones de problemas de la asignatura troncal *Matemáticas*. La idea es que, mediante estas sesiones de prácticas con ordenador, los alumnos lleguen a desarrollar las habilidades computacionales necesarias para explorar por si mismos los conceptos expuestos en las sesiones teóricas.

---

<sup>6</sup>Por ejemplo, en MATLAB, el cálculo de la transformada de Fourier de una imagen, *i*, es tan fácil como escribir: `I=fftshift(fft2(i));`.

<sup>7</sup>Por citar sólo ejemplos llamativos, mientras que *Óptica Física Aplicada* no se imparte por falta de estudiantes, hay alumnos que completan créditos de libre opción con cursos como *Cata de Vinos* o *Danza y Expresión Corporal*.

En los casos en los que esto resulta exitoso no sólo se consigue que los alumnos comprendan realmente el sentido de la teoría, sino que *incluso*, podrían tomar consciencia de la importancia de tener habilidades analíticas (y no sólo computacionales), aunque no se les exija tal cosa en los exámenes.

El objetivo utópico es que los estudiantes que iniciaron una titulación (aparentemente) no científica, lleguen a comprender porque es importante abordar los problemas desde una perspectiva cuantitativa e incluso (cuando sea posible) analítica. Es decir, que se convenzan de que, *en contra de la imagen mas extendida*, la 'Percepción Visual' también es una materia *intrínsecamente* cuantitativa, y de que el esfuerzo de formalización no es una pérdida de tiempo.

Somos conscientes de lo ambicioso de este planteamiento. Aunque este objetivo cuenta con el apoyo entusiasta de varios miembros del Departamento de Óptica y del Departamento de Geometría y Topología<sup>8</sup>, también nos encontramos con serias dificultades:

- La realidad, que siempre es más dura de lo que uno piensa.
- La opinión de otros miembros del Departamento de Óptica, que discuten, legítimamente, la oportunidad de este tipo de formación (contenidos y orientación cuantitativa). Sus objeciones razonables se basan en que este tipo de formación resulta superflua dadas las actuales opciones profesionales de los ópticos-optometristas.

Nosotros pensamos que, a pesar de todo, el esfuerzo merece la pena, aunque sólo fuese para formar a personas con una cierta capacidad crítica (supuestamente esta también es una función de la Universidad).

### 3.7 ¿Qué pasa si se fracasa en el intento?

Aunque llevamos varios años experimentando en la citada dirección, todavía no hay garantía de que el esfuerzo dé los frutos deseados.

Cabe por tanto preguntarse que pasaría si el intento no tuviese éxito (y acabamos optando por la solución conservadora). Aquí van algunas consecuencias posibles:

- La Dra. Maria José Luque y yo mismo habríamos perdido unos años de nuestra vida: sencillamente habríamos hecho *el canelo*.

Esta consecuencia, de escaso peso debido a su carácter personal, tiene, no obstante, gran importancia para nosotros, ya que de saberlo, desde el principio habríamos optado por la solución conservadora.

- Como he dicho antes, la materia (sin el pertinente complemento cuantitativo) se desnaturalizaría en cierta medida.

---

<sup>8</sup>Los que se encargan de dar las Matemáticas de la Diplomatura de Óptica y Optometría.

- Aumentarían las posibilidades de que las diferentes asignaturas correspondientes a esta materia modificaran su carácter (por ejemplo de *obligatorias* a *optativas*) o incluso desapareciesen en futuras reformas de los planes de estudio.
- En cualquier caso (si esto sirve de algún consuelo), las salidas profesionales de los ópticos optometristas permanecerían básicamente inalteradas. A pesar de lo mucho que nos pueda gustar esta materia, somos conscientes de que tiene una importancia limitada dentro del ejercicio de esta profesión.

### 3.8 Nota aclaratoria

El tono de este capítulo podría transmitir la idea de que los miembros del departamento que apoyan de forma entusiasta este planteamiento lo comparten al 100%.

Esto no es así.

Entre nosotros existe una fructífera discusión sobre *hasta qué nivel* debe hacerse hincapié en la formalización.

Aunque, como dije antes, algunos consideramos que el formalismo es una herramienta muy importante, reconocemos que es posible manejarse de forma muy competente en las aplicaciones clínicas sin un conocimiento profundo del mismo. En el caso de estas aplicaciones, basta con que los alumnos comprendan que el comportamiento macroscópico (*psicofísico*) tiene una sólida base microscópica (*fisiológica*).

La base de nuestro acuerdo es que, aun en el caso de que se opte por incidir en la relación entre psicofísica y fisiología en vez de enfatizar la importancia de los modelos, *lo esencial es conseguir que el alumno razone*.

Y, en tal caso, las dificultades (y soluciones) docentes con las que nos encontramos son básicamente las mismas.

# Bibliografía

- [1] John Losee. *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*. Alianza Universidad, Madrid, 1976.
- [2] Isaak Newton. *Optica*. (Traducción castellana de Carlos Solís) Alfaguara, Madrid, 1977.
- [3] D. Gabor. Theory of communication. *J. Inst. Elect. Eng.*, 93:429–457, 1946.
- [4] C.E. Shannon. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 27:373–423, 1948.
- [5] N. Wiener. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, chapter 6: *Computing machines and neural system*. MIT Press, Massachusetts, 1948.
- [6] E. Shrodinger. Grundlinien einer theorie der farbenmetrik im tagessehen. *Ann. Physik*, 63:481–495, 1920.
- [7] John Von Neumann. *The computer and the brain*. Yale University Press, New Haven, 1958.
- [8] Richard P. Feynman. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison Wesley, New York, 1989.
- [9] A.B. Watson and A.J. Ahumada. A hexagonal orthogonal oriented pyramid as a model of image representation in visual cortex. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 36:97–106, 1989.
- [10] E P Simoncelli and B A Olshausen. Natural image statistics and neural representation. *Annual Review of Neuroscience*, 24:1193–1216, 2001.
- [11] Karl Popper. *Conjectures and Refutations*. Basic Books, New York, 1963.
- [12] Thomas S. Khun. *The structure of scientific revolutions*. Chicago University Press, 1970.
- [13] Paul K. Feyerabend. *Against the method: outline of an anarchist theory of knowledge*. Minnesota University Press, 1970.



## Capítulo 4

# Metodología Docente

En el capítulo anterior hemos dado algunas ideas para exponer de los contenidos tratando de evitar el fracaso académico y la desnaturalización de la materia:

- Simplificar el temario.
- Ilustrar los contenidos.
- Computacional en vez de analítico.

A continuación se darán algunos ejemplos concretos de como estamos intentando implementar los puntos anteriores. Particularmente el esfuerzo por introducir de forma sencilla los conceptos matemáticos (difíciles para los estudiantes de la Diplomatura) mediante el uso de herramientas numéricas.

Dicha perspectiva determina mi visión del uso de las clases de teoría, los laboratorios y el aula de informática en las distintas asignaturas que constituyen este Proyecto Docente.

Por último hablaré de las técnicas de evaluación diferenciada en función del carácter de cada parte de cada asignatura.

Los mismos expertos en didáctica universitaria (entre los que no creo encontrarme) consideran que no existe una fórmula mágica para conseguir el éxito docente [1]. De hecho algunos autores [2] llegan a cuestionar la importancia del profesor: según ellos, mientras que los buenos estudiantes cumplirán los objetivos más ambiciosos con independencia de la mediocridad del profesor, ciertos estudiantes son un caso perdido a pesar de la ayuda de un buen profesor.

Por tanto, como es evidente, las ideas aquí expuestas deben considerarse tan sólo como un acicate personal que me impulsa al desarrollo de materiales para que puedan ser utilizados por los alumnos y alcancen así, desde mi punto de vista de manera más sencilla, una comprensión profunda de la materia. Quizá lo más positivo de esto es que el convencimiento de la utilidad de un esfuerzo en una cierta dirección se traduce en un entusiasmo docente que puede estimular a los alumnos.

No obstante, de acuerdo con mi formación científica, en ningún caso pienso que haya dogmas fijos en los que haya que reafirmarse si los hechos muestran su ineficacia: si resulta que el uso de herramientas numéricas como apoyo para la comprensión de los fenómenos y los modelos no facilita su asimilación por parte de los alumnos, no dudaré en renunciar a esta aproximación. En tal caso, por lo menos se habrán desarrollado materiales útiles para el profesor para ilustrar las clases de teoría.

Al final son los estudiantes los que tienen la última palabra.

## 4.1 Simplificar el temario

Para conseguir ahorrar tiempo en la presentación de la materia y que los estudiantes consigan dominar sus aspectos fundamentales es necesario concentrarse en pocos puntos para analizarlos con el suficiente detenimiento.

Esto nos obliga a tomar difíciles decisiones sobre los fenómenos que deben cubrirse en las asignaturas.

A continuación expongo algunos criterios que a mi juicio pueden usarse para descargar contenidos del temario manteniendo el objetivo de transmitir los contenidos básicos de la materia y los aspectos técnicos para su dominio.

### General frente a particular

Un problema habitual en el estudio de la fenomenología de la 'Percepción Visual' es la amplitud de la casuística que puede considerarse. Este problema proviene del fuerte carácter empírico que tiene la materia para cierta parte de la comunidad que se dedica a su desarrollo y se manifiesta en el fuerte contenido empírico de los libros de texto disponibles.

Un estudio pormenorizado de muchos fenómenos considerando variaciones respecto de numerosos factores experimentales conduce a que finalmente los estudiantes acaben con un montón de fotocopias con curvas experimentales y una considerable *confusión*.

Pienso que analizar con detenimiento la descripción general de un comportamiento (deduciendo solamente algunos casos particulares) en ocasiones es más provechoso que llegar al caso general habiendo analizado todos los casos particulares. Esto da la oportunidad de ganar tiempo y clarificar las ideas de los estudiantes.

Por ejemplo, quizá es más importante entender las implicaciones de la respuesta del sistema visual a redes espacio-temporales, que analizar en detalle la casuística de las bandas de Mach, las dependencias de la frecuencia crítica de fusión y las particularidades del tiempo de reacción en estímulos cuadrados. Todos estos fenómenos pueden entenderse bien conociendo como actúa un filtro lineal.

Otro ejemplo es la discusión sobre la diferencia entre los umbrales de detección de redes espacio-temporales y redes parpadeantes (a la hora de determinar

la CSF espacio-temporal). Al analizar el significado del dominio de Fourier 3D queda claro que la forma correcta de determinar la CSF espacio-temporal es utilizar redes en movimiento y no redes parpadeantes. Si el estudiante conoce la herramienta para analizar el contenido frecuencial de redes parpadeantes llegado el caso (si hubiese necesidad) podrá ver que las redes parpadeantes de contraste,  $C$ , están formadas por dos redes de la misma frecuencia (en módulo) con movimientos opuestos y contraste  $C/2$ , con lo cual, como son percibidas por mecanismos diferentes, es lógico que su umbral se duplique.

La discusión sobre las redes parpadeantes puede ser de interés histórico [3] y constituir un ejemplo de la ausencia de interacción entre canales independientes por debajo del umbral, pero creo que es preferible concentrarse en la comprensión del concepto general la transformada de Fourier 3D (cuya base son las redes en movimiento) en vez de analizar el caso particular de las redes parpadeantes.

Un último ejemplo (en este caso generalizador) es aproximarse al estudio de la visión espacial considerando las imágenes como puntos en un espacio vectorial. De esta forma se establece una conexión entre la representación triestímulo del color y la representación de las imágenes mediante las respuestas del banco de filtros presentes en el córtex. Y además se entiende de la misma forma los umbrales de discriminación cromática y los umbrales de discriminación de patrones espacio-temporales.

### Primer orden frente a segundo orden

Otro aspecto problemático de la literatura de corte empírico consiste en no hacer una clara distinción entre el orden de magnitud de los fenómenos descritos, de manera que en muchas ocasiones es fácil perderse en los detalles de la descripción de un fenómeno de interés académico que puede tener pocas consecuencias en condiciones normales de visión.

En la actualidad, existe un gran interés por relacionar el comportamiento del sistema visual con las características de las imágenes naturales, criticándose la realización de experiencias en condiciones excesivamente extremas (no naturales). No obstante, todavía son muy de agradecer (por lo infrecuente) comentarios en los libros de texto sobre el carácter *elusivo* de ciertos efectos visuales (por ejemplo el comentario de Fairchild refiriéndose al efecto Helson-Judd [4]).

Desde mi punto de vista, debido a las limitaciones de tiempo, hay que concentrarse en los fenómenos de primer orden.

En este sentido el papel de las herramientas informáticas es muy importante para el profesor porque mientras que los efectos de primer orden son aparentes hasta con unos medios de reproducción limitados, los efectos de segundo orden requieren unas condiciones experimentales más precisas.

## 4.2 Ilustrar los contenidos

En una materia como la 'Percepción Visual' impartida en el contexto de una Diplomatura de Óptica la necesidad de la ilustración de los contenidos es doble:

- Por una parte, es muy conveniente mostrar ejemplos visuales para ilustrar la fenomenología, tanto (evidentemente!) en las sesiones prácticas como también, si es posible, en las sesiones de teoría.
- Por otra parte, es muy conveniente mostrar a los estudiantes los conceptos matemáticos mediante ejemplos antes que mediante demostraciones analíticas.

Como ya apuntaba en el apartado anterior, el papel de las herramientas informáticas es muy importante en este sentido tanto para el profesor como para los alumnos.

Disponer de este tipo de herramientas sirve para que el profesor ilustre sus clases y diseñe experiencias de laboratorio. Pero, lo que es más importante, con una documentación adecuada y encontrando acomodo en las sesiones prácticas de las asignaturas, estas herramientas pueden ser de gran utilidad para que los alumnos se *auto-ilustren* los conceptos.

Si los alumnos lo desean, por una parte les permite generar sus propios tests y comprobar los efectos de primer orden por sí mismos, y por otra parte les permite explorar más fácilmente los conceptos analíticos.

## 4.3 Computacional en vez de analítico

La comprensión de los conceptos incluye necesariamente la capacidad para trabajar cuantitativamente con ellos. Esta es la misión de la parte de problemas que debe acompañar a una exposición teórica. Como dije, sin este complemento cuantitativo, creo que la materia se *desnaturaliza* en cierta medida.

En el ámbito de la 'Percepción Visual' tan sólo es sencillo el trabajo analítico en el caso de cálculos simples de colorimetría triestímulo. De hecho, la parte relativa a la colorimetría triestímulo de la asignatura de *Psicofísica de la Visión* (véase el capítulo 5) es la única donde resulta sencillo el planteamiento de problemas *tradicionales* que los alumnos pueden resolver *a mano* y ser corregidos en clase de pizarra.

Sin embargo, en los casos realmente interesantes, ya sea debido a su carácter farragoso o a su complejidad intrínseca, la solución analítica de problemas resulta tediosa o inabordable.

Por ello, si pretendemos dotar a este bloque de asignaturas de un carácter cuantitativo (no meramente descriptivo), es necesario presentar a los alumnos las herramientas (numéricas) que se utilizan en la práctica para resolver problemas.

Por lo tanto, la utilidad del uso de herramientas numéricas no se reduce a la ilustración de los conceptos de la que hablábamos en el apartado anterior, sino

que es imprescindible para solucionar problemas reales (por ejemplo, cálculo de apariencias del color, cálculo de distancias entre estímulos cromáticos o espaciales, cálculo de pares correspondientes, predicción de imágenes percibidas, etc...).

En este aspecto cuantitativo, la 'Percepción Visual' tiene un cierto solapamiento con el Procesado de Imágenes e implica (como mínimo) el manejo de imágenes en el ordenador.

Hace unos años, hubiese sido impensable plantear este tipo de aproximación numérica en una titulación como la Diplomatura de Óptica porque el trabajo numérico necesariamente estaba asociado a la programación en lenguajes de (relativo) bajo nivel como Fortran, Pascal o C.

Sin embargo, desde de la aparición de software matemático interpretado como MATLAB o *Mathematica*, el trabajo con dichas herramientas es tan directo (o indirecto!) como el uso de una calculadora científica.

Con estas facilidades para la realización de cálculos avanzados, pienso que merece la pena experimentar con el uso de estas herramientas en la docencia, planteándolas como alternativa a las clases de problemas cuando resulta evidente que no es posible la solución analítica de los problemas.

## 4.4 Uso de Matlab y Colorlab como material de apoyo

Las ideas anteriores han ido evolucionando con el tiempo hasta este estado actual (quizá demasiado optimista en las posibilidades de esta aproximación).

Originalmente, cuando inicié mi docencia en *Colorimetría* en el curso 95/96 empecé a desarrollar ingenuamente algunas funciones *ad-hoc* para MATLAB tan sólo para aprender yo mismo el significado de los conceptos que debía explicar (y eventualmente generar ejemplos para mostrar en las clases de teoría).

Hasta ese momento la generación de colores (y en general de estímulos) en monitor para su uso en psicofísica era una práctica habitual en cualquier laboratorio de investigación (también en el de este Departamento), pero, debido a las limitaciones de los 286 y los 386 (!), estaba ligada siempre a la programación en un lenguaje de bajo nivel y restringida a la generación de estímulos muy concretos para su uso en experimentos particulares.

Sin embargo, aquellos ordenadores (especialmente los nuevos 486) podían empezar a trabajar (casi) cómodamente con software interpretado como MATLAB y *Mathematica*. Y estas herramientas empezaban a dar unas capacidades gráficas prometedoras con un esfuerzo mínimo en la programación.

Por eso, en esa misma época otros grupos de investigación (por ejemplo el grupo de Andrew Watson en NASA Ames y el grupo de Dennis Pelli en la NYU) empezaron a desarrollar herramientas de psicofísica para este tipo de lenguajes interpretados [5, 6, 7].

En nuestro grupo, movidos fundamentalmente por la curiosidad y el interés docente fuimos construyendo poco a poco la librería COLORLAB para MATLAB.

### Prácticas cerradas en *Psicofísica*

En primera instancia, las personas involucradas en este esfuerzo, fundamentalmente la Dra. María José Luque y yo, pensamos que aquello podía ser útil para el diseño de prácticas *cerradas*. En este tipo de prácticas los alumnos utilizan MATLAB como *caja-negra* alternativa a un montaje óptico o a una tarjeta gráfica más avanzada para generar estímulos.

Este tipo de prácticas empezó a implantarse en el curso 96/97 en *Óptica Fisiológica II* (análogo de *Psicofísica de la Visión* en el anterior plan de estudios), y hoy constituyen el núcleo de las prácticas en esta asignatura.

Podría pensarse que este tipo de prácticas en principio sólo tiene ventajas para el profesor, que cuenta así con una flexibilidad que no le permiten los sistemas ópticos o los lenguajes de programación de más bajo nivel. De hecho, podría argüirse que pueden entrañar un cierto perjuicio para el estudiante porque se le limita al estudio de los fenómenos que *pueden generarse con la herramienta*.

Sin embargo, como demuestran las actuales prácticas de la asignatura *Psicofísica de la Visión* (que ahora cubren todos los aspectos del temario: luminosidad, color, textura y movimiento) el estudio de efectos de primer orden es perfectamente abordable utilizando las capacidades de los ordenadores actuales<sup>1</sup> y la perspectiva es que las cosas mejoren considerablemente en el futuro.

Además, precisamente por la mejora de los ordenadores, estos han desplazado a los montajes ópticos en la práctica psicofísica real y por lo tanto la formación de los estudiantes debe adecuarse a esta realidad. Por tanto, también es muy conveniente estudiar como controlar estos nuevos *generadores de estímulos* (como se hace en el tema 8 y en la práctica 2 de la asignatura *Colorimetría y Visión del Color*).

### Ejercicios abiertos en *Colorimetría*

En segundo lugar, conforme íbamos avanzando en el desarrollo de la (entonces embrionaria) librería, pensamos que si simplificáramos las funciones para hacer cálculos colorimétricos y representación de imágenes calibradas, podría llegarse a un uso de la herramienta informática mucho más interesante.

Además de su utilización *instrumental*, sería posible utilizar MATLAB para la solución de problemas que le dieran contenido cuantitativo a las asignaturas.

Fue en ese momento cuando decidimos en serio generar COLORLAB [8]: una *toolbox* coherente y bien documentada que pudiese instalarse y usarse fácilmente con un conocimiento superficial de MATLAB.

---

<sup>1</sup>Como ejemplos, ahora pueden generarse secuencias en movimiento con precisión suficiente si la frecuencia de muestreo temporal es relativamente baja, del orden de 20-30 Hz, como en la práctica 5 de *Psicofísica*, y el problema del calibrado se resuelve tan rápidamente que permite hacer experiencias de igualación con cualquier base de colores generable en el monitor, como en la práctica 3 de *Psicofísica*.

Más que incluir un conjunto amplio de representaciones cromáticas, nos interesaba fundamentalmente que, por un lado, las rutinas cubriesen de forma integrada todos los pasos del trabajo con el color: la medida (pasar de radiancias y reflectancias a vectores triestímulo y descriptores perceptuales), el procesado y la reproducción (en el monitor), y por otro lado, hubiese herramientas de representación de colores en diagramas cromáticos y espacios triestímulo. La figura 4.1 recoge el conjunto de transformaciones que pueden hacerse en COLORLAB.

De esta forma los estudiantes pueden en principio:

- Definir numéricamente estímulos y colores, y *ver* los resultados de cualquier actuación sobre los mismos. Es decir, ponerse ejemplos para *ver* lo que se les explica en teoría.
- Realizar cálculos interesantes con la misma dificultad con la que se usa una calculadora.

La idea era que además de plantear prácticas experimentales *cerradas* como las de *Psicofísica*, pudiesen plantearse *prácticas-problema abiertas* en las que los estudiantes utilizan la herramienta como un método sencillo para hacer cálculos colorimétricos de interés.

Este tipo de prácticas empezó a introducirse paulatinamente en la asignatura *Colorimetría y Visión del Color* a partir de los cursos 97/98 y 98/99. En la actualidad, la mayoría de las sesiones prácticas de esta asignatura (salvo dos prácticas *experimentales* dedicadas a medida y reproducción del color) están planteadas como clases de problemas abiertos.

Esta herramienta hace posible dar un complemento cuantitativo completo a la fenomenología de la percepción del color. De esta forma se superan las limitaciones de los tradicionales problemas de paso de valores triestímulo a coordenadas cromáticas y cambio de base (que, no obstante, seguimos incluyendo en *Psicofísica*).

### Ejercicios abiertos en *Percepción*

El éxito de unas prácticas de este carácter (ahora consolidadas en *Colorimetría*) nos ha llevado a tratar de exportar la experiencia al ámbito de la visión espacial.

En el caso de la visión espacial, la dificultad para ofrecer un complemento cuantitativo a la exposición de la fenomenología es aún mayor que en caso de la visión del color porque los modelos son (aparentemente<sup>2</sup>) más complejos.

Debido a esa dificultad también es muy interesante un esfuerzo en esta dirección, aunque (debido a que es la parte que aun no hemos experimentado), quizá la propuesta presentada en este proyecto docente resulte muy ambiciosa.

Precisamente con objeto de ir preparando el camino para la aplicación de estas ideas a la asignatura *Percepción Visual* y sus correspondientes sesiones

---

<sup>2</sup>En realidad, uno de los objetivos que me gustaría cumplir con el temario que presento para *Percepción* es resaltar la similitud entre los modelos espaciales y los cromáticos: finalmente todos los modelos (tanto cromáticos como espaciales) se reducen a expresar los estímulos en una base de vectores y aplicarles después no linealidades de tipo sigmoideal. La dificultad aparente en el caso espacial proviene de la mayor dimensionalidad del espacio.

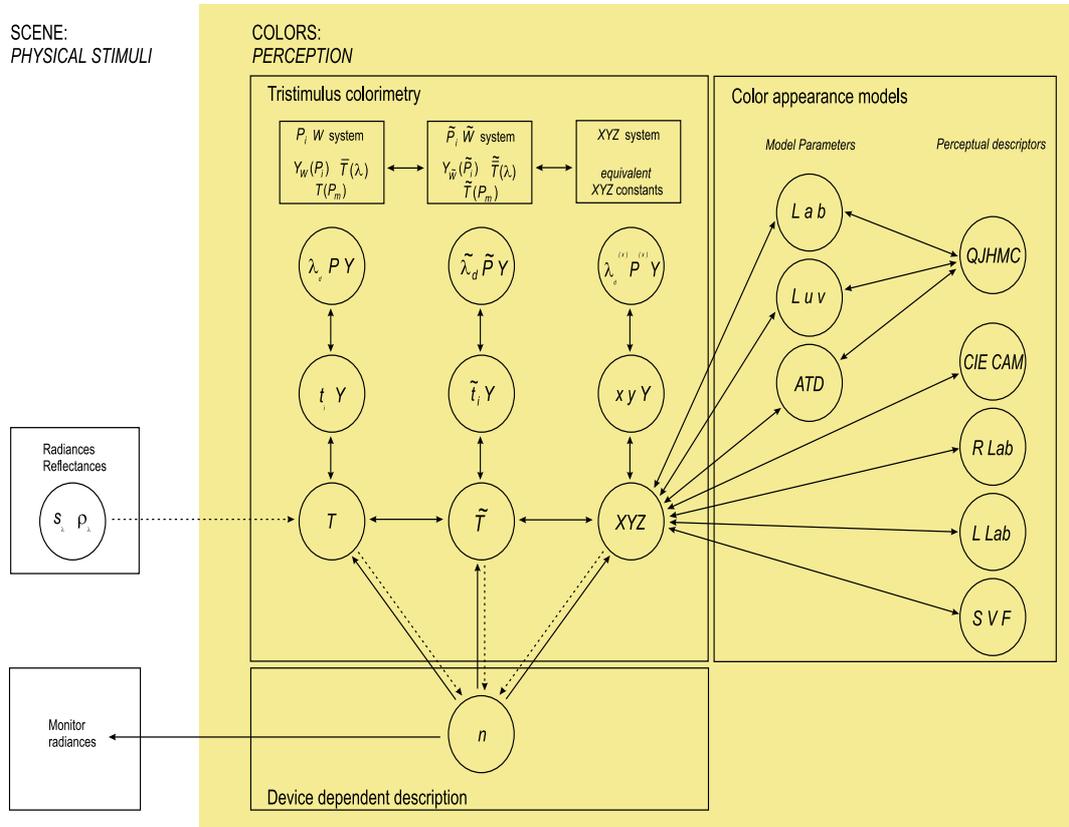


Figura 4.1: Transformaciones de COLORLAB que incluyen desde la definición de estímulos hasta la reproducción de los mismos en el monitor usando la caracterización informática dependiente del dispositivo,  $n$ . Las representaciones triestímulo del color incluyen vectores triestímulo,  $T$ , coordenadas cromáticas y luminancia,  $(t, Y)$ , y longitud de onda dominante, pureza y luminancia,  $(\lambda_d, P, Y)$ , en cualquier sistema de primarios. En la figura se muestran dos sistemas triestímulo genéricos y el sistema estándar CIEXYZ. Así mismo se incluyen múltiples modelos de apariencia del color. (Tomado de la Guía del Usuario de COLORLAB [8]).

prácticas, propusimos a los compañeros del Departamento de Geometría y Topología (encargado de la docencia de la asignatura *Matemáticas* en la Diplomatura de Óptica) la posibilidad de la introducción de MATLAB en sus clases de problemas. Ellos acogieron la propuesta con gran entusiasmo y este planteamiento de las clases de prácticas de *Matemáticas* (3 créditos) comenzarán el curso próximo 02/03.

Por tanto, dentro de tres años, todos los alumnos que lleguen a tercero habrán cursado las sesiones prácticas de *Matemáticas* con MATLAB, y muchos

de ellos también habrán cursado la asignatura optativa de *Colorimetría*, con lo cual, estarán más habituados al uso del ordenador como herramienta de cálculo y no sólo como mero generador de estímulos (diseñados por el profesor).

Creemos que estas prácticas representarán un cambio cualitativo en la preparación de los estudiantes que lleguen a tercero, porque, según nuestra experiencia actual en *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico* (donde también se utiliza MATLAB para la generación de tests espaciales y cromáticos), se observa claramente que los alumnos que cursaron la *Colorimetría* tienen más iniciativa y empiezan a ver MATLAB más como una ventaja que como un obstáculo.

Basándonos en esta experiencia, y con la expectativa de este cambio positivo, en este Proyecto Docente presento la asignatura de *Percepción Visual* con una orientación que se apoya fuertemente en el uso del ordenador para ilustrar cuantitativamente los conceptos.

En este caso, de momento sólo contamos con un pequeño grupo de funciones específicas (ordenación de imágenes como vectores, reproducción y filtrado 3D de secuencias, modelo sencillo de campo receptivo con oposición espectral) y con la librería de representación cortical de Eero Simoncelli [9]. Pero la idea, análoga a la de COLORLAB, es que este conjunto de funciones crezca hasta configurar un entorno integrado.

También en este caso, las prácticas se plantean como ejercicios abiertos en los que se presenta a los estudiantes las funciones necesarias para explorar los conceptos correspondientes a cada práctica, y después ellos resuelven un conjunto de cuestiones propuestas.

#### ¿Es esto Percepción Visual o simplemente Informática?

La organización de las asignaturas relacionadas con la 'Percepción Visual' es naturalmente una tarea de equipo donde debatimos sobre el peligro que entraña el hecho de que los estudiantes se atasquen con la herramienta informática y puedan perder de vista los objetivos fundamentales. En ocasiones nos asalta siguiente la pregunta: ¿es esto 'Percepción Visual', o es simplemente Informática?

Esto plantea un debate interesante sobre *hasta donde* deben conocer los alumnos la herramienta informática.

Mi opinión es que *idealmente* los alumnos deberían quedarse en el nivel matemático (si relacionado con la 'Percepción Visual') sin llegar al nivel informático. Es decir, deben ser capaces de explotar la capacidad de cálculo para resolver/explorar las cuestiones relevantes, pero naturalmente no deberían llegar a preocuparse por los detalles técnicos sobre implementación eficiente de algoritmos o generación eficiente de estímulos.

El ejemplo concreto de las prácticas en las que intervienen secuencias de puntos aleatorios (práctica 5 de *Psicofísica de la Visión* y práctica 2 de *Percepción Visual*) sirve para poner de manifiesto los diferentes niveles de resolución relacionados con el uso de la herramienta informática, y queda bien patente

la diferencia entre el nivel informático (generación eficiente de los estímulos) y los niveles experimental y matemático necesarios para la comprensión de los fenómenos.

La práctica 5 de *Psicofísica*, tiene como objeto la determinación experimental del umbral de coherencia necesario para pasar de la percepción de movimiento aleatorio a percibir un movimiento coherente.

En este caso se trata de una práctica *cerrada* donde el objetivo fundamental es la utilización de la técnica psicofísica de los estímulos constantes para medir dicho umbral. No obstante, pretendemos que los estudiantes vuelvan a enfrentarse con este tipo de estímulos en las prácticas de *Percepción Visual* en este caso para analizar su contenido frecuencial.

El tipo de diseño de las secuencias de puntos aleatorios que se utilizan no es indiferente en función del tipo de análisis que esperamos que hagan los estudiantes. Como vamos a ver, esto tiene consecuencias *informáticas* relevantes (para el profesor) que, sin embargo, no afectan negativamente al alumno (que tan sólo va a ocuparse de los aspectos relevantes desde el punto de vista de la 'Percepción Visual').

Al nivel de resolución más bajo, tenemos los **problemas técnicos asociados al funcionamiento particular de la herramienta concreta**.

MATLAB puede representar secuencias de fotogramas mediante la función `movie`. No obstante, por cuestiones técnicas, `movie` actúa sobre una variable gráfica intermedia con un formato especial que no es una secuencia de matrices con las luminancias de los píxeles en cada posición. La ventaja de esto es que MATLAB cuenta con funciones (`getframe`) para generar este tipo de variable intermedia a partir, no sólo de imágenes estándar (matrices), sino también de cualquier serie de gráficas hechas con MATLAB, por ejemplo mediante `plot`.

De este modo, teníamos dos opciones para la generación de las secuencias con las que deben realizarse los experimentos.

- Por un lado, podíamos usar una sencilla función gráfica (`plot`), para posicionar los puntos en cada fotograma y pasar directamente a la variable tipo `movie` *sin generar una serie de matrices con la luminancia en cada punto*.
- Por otro lado, podíamos generar explícitamente una serie de imágenes (matrices) con las luminancias correspondientes y después acabar pasando a la variable tipo `movie`.

La primera opción es sencilla para generar los estímulos (y suficiente para una práctica *cerrada* de tipo experimental), sin embargo, no permite acceder a los datos de la secuencia, con lo que no se pueden hacer cálculos sobre el estímulo (por ejemplo calcular su espectro 3D).

A un nivel un poco más abstracto, se presentan **problemas relacionados con el procesado de imágenes y la geometría computacional**.

Si uno quiere generar explícitamente la serie de imágenes discretas teniendo un movimiento suave de los puntos (teniendo desplazamientos de tamaño menor que un píxel) hay que simular el proceso de muestreo de una señal continua para obtener los fotogramas discretos.

Si un objeto no cubre un píxel completo (por ejemplo un borde que ha avanzado menos de un píxel), el nivel de gris en ese píxel es un promedio ponderado de la luminancia de ese objeto y la luminancia del fondo. Esta cuestión hay que resolverla para cada píxel teniendo además en cuenta que en la escena existen centenares de objetos que eventualmente pueden superponerse debido a que se desplazan con un movimiento cualquiera.

Para hacer esto rápidamente hay que resolver de forma recursiva un problema de intersección de rectángulos.

Finalmente llegamos al nivel de **análisis de los estímulos**.

Lo realmente relevante para entender la percepción provocada por una secuencia de este tipo es analizar su espectro 3D.

Para ello basta con utilizar las funciones que hemos desarrollado para el cálculo y representación de transformadas de Fourier espacio-temporales (`fft3` y `vertf3d`).

Me he extendido en este caso concreto porque aquí resulta patente que, a pesar de que existen muchos detalles que pueden ser relevantes para el diseño de experimentos en un laboratorio de investigación, el único nivel que deben conocer los alumnos es el nivel de análisis (que definitivamente si está relacionado con la 'Percepción Visual' y no con la informática): en este caso concreto deben ser capaces de cargar secuencias y analizarlas inspeccionando su espectro (esto es lo que hacen fundamentalmente en la parte de práctica 2 de *Percepción Visual* en la que se trabaja con secuencias).

## 4.5 Las clases de teoría y de problemas

La *lección magistral* como sistema básico de enseñanza universitaria en la que el profesor lee-expone-explica los contenidos del programa, sigue constituyendo, con ligeras variantes, el sistema docente más habitual en las actuales aulas universitarias. Además de la *lección magistral* puede entenderse una docencia basada en un cierto grado de actividad dialogada entre los alumnos y el profesor, aunque recayendo más el peso en éste último. Tal definición corresponde a la clase dialogada.

Para obtener buenos resultados en la exposición del tema y asimilación de la materia por parte del alumno, conviene seguir una serie de pasos que faciliten la claridad de lo expuesto:

- Presentar el tema mediante una breve introducción, es decir, exponer lo que se va a decir y los objetivos que se esperan conseguir.

- Desarrollar el contenido con vitalidad y entusiasmo, enfatizando los aspectos fundamentales, haciendo el máximo esfuerzo por motivar al alumno.
- Situar el tema haciendo alusiones a problemas reales.
- Mantener una actitud abierta, fomentando el planteamiento de cuestiones que despierten la atención del alumno, y faciliten su participación.
- Proponer y desarrollar ejemplos de aplicación de los temas teóricos. Este debe ser el objetivo de las sesiones de problemas y de las sesiones prácticas en el aula de informática.
- Efectuar, cuando sea posible, pequeñas demostraciones a modo de *experiencias de cátedra*. En este sentido, y considerando el carácter especial de la 'Percepción Visual', es muy útil el uso del proyector de vídeo y herramientas como las citadas arriba.
- Resumir al comienzo de cada clase los aspectos más importantes desarrollados en la clase anterior.
- Resumir, al finalizar la clase, los aspectos más importantes tratados, así como las conclusiones obtenidas.

Para que la lección magistral pueda adoptar esta estructura comunicativa, es necesario preparar en profundidad las clases teóricas. Se deberán analizar los objetivos que el profesor pretende alcanzar; a continuación se hará una selección razonable de contenidos, y finalmente se organizará la secuencia de la explicación, así como el material que se empleará en la exposición. La selección de contenidos debe ser cuidadosa, tanto en la cantidad como en el tipo de tratamiento (nivel de abstracción, nivel matemáticos, conexiones con otras materias, aplicaciones a situaciones reales).

A pesar de sus múltiples ventajas, sin embargo la clase magistral adolece de algunos inconvenientes, sobre todo generados por la situación de protagonismo por parte del profesor. Ante esto el alumno toma una situación pasiva, puramente receptiva, por ello ha de ser misión ineludible por parte del profesor el motivar y estimular la atención de los estudiantes, haciéndolos partícipe del transcurso de la clase, mediante preguntas, observaciones prácticas, etc. De todas formas la pasividad del estudiante es un hecho absolutamente demoledor para la aplicación de cualquier técnica didáctica, y se confía en el *sexto sentido* pedagógico por parte del profesorado que ha de ponerse en posición de alerta ante la pasividad.

Los docentes nos hemos de convertir en explicadores, guías, facilitadores de la comprensión, animadores, etc. Además, conviene parar, de vez en cuando, nuestras explicaciones y hablar con los alumnos sobre cómo van las cosas, cómo va funcionando el curso y qué es lo que más les gusta y qué lo que les disgusta de las clases. Son momentos importantes para aclarar malentendidos, para establecer reajustes en las formas de relación o simplemente para intercambiar también las vivencias que unos y otros tenemos sobre el curso. En general, si no

resultan demasiado formales y ficticios, los alumnos suelen agradecerlo mucho y lo valoran como un rasgo de apertura y proximidad del docente.

Como he dicho antes, las clases de teoría deben complementarse con clases de aplicación cuantitativa de los conceptos presentados en teoría. Esta es la misión de la parte de problemas que debe acompañar a una exposición teórica.

Sin embargo, como expuse arriba, en 'Percepción Visual' resulta complicado abordar este complemento necesario en clases de problemas tradicionales (de pizarra). Por eso para las asignaturas de *Colorimetría y Percepción Visual* nos hemos esforzado en plantear clases prácticas de ejercicios a resolver en el aula de informática.

## 4.6 Las sesiones prácticas: laboratorios y aula de informática

Como hemos visto antes, en función del carácter de la asignatura es conveniente plantear diferentes tipos de sesiones prácticas:

### Sesiones de laboratorio

Estas sesiones están dedicadas a la medida experimental de parámetros, con el objeto de aprender técnicas psicofísicas y corroborar efectos estudiados en las sesiones de teoría (como en las prácticas de *Psicofísica de la Visión*), o con objeto de aprender a manejar instrumental específico (como en las prácticas 1 y 2 de *Colorimetría y Visión del Color*, dedicadas al estudio de aparatos para la medida y la reproducción del color).

En las prácticas de corte psicofísico se utiliza circunstancialmente una herramienta informática para la generación de estímulos, pero el estudiante hace un uso instrumental de la misma. En este caso lo importante es la correcta aplicación de las técnicas psicofísicas y el análisis de los datos experimentales como ilustración práctica de la fenomenología descrita en clase.

### Sesiones prácticas *abiertas* en el aula de informática

Por las dificultades comentadas anteriormente, estas sesiones son realmente sesiones alternativas a las clases de problemas tradicionales.

También, en ciertas ocasiones se plantean como método para ilustrar los conceptos analíticos mediante ejemplos de forma que los alumnos ganen intuición de forma más sencilla que mediante un dominio avanzado de las matemáticas.

Estas prácticas se plantean de un modo abierto, planteando a los alumnos problemas a resolver revisando a priori las herramientas que pueden utilizar para la solución. Son ellos quienes deben tener la iniciativa para realizar los cálculos adecuados para resolver los problemas o cuestiones propuestas.

Este tipo de prácticas están en principio diseñadas para que el trabajo se inicie en el horario destinado a las prácticas y se complete mediante trabajo

personal del alumno fuera de este horario, como ocurre con los problemas tradicionales (que resultan de poca utilidad si los estudiantes no los trabajan en casa).

La misión de las sesiones es que el profesor les presente las herramientas que les permitirán resolver los problemas y les dé las orientaciones metodológicas necesarias para abordarlos de forma análoga a las sesiones de problemas donde el profesor no resuelve completamente todos los apartados de los problemas propuestos. En cualquier caso, este proceder se va dosificando a lo largo del curso (sobre todo en *Colorimetría*), de forma que al principio las prácticas son más guiadas, y al final los alumnos cuentan con más libertad (por ejemplo en la práctica 6 de *Colorimetría*).

En la actualidad esto es posible debido a que muchos estudiantes cuentan con ordenadores y, en cualquier caso, siempre pueden hacer uso de las aulas de informática del campus donde están instalados los programas necesarios para las prácticas.

## 4.7 Las tutorías

De acuerdo con la ley vigente, el profesor debe disponer de un número de horas acorde a su dedicación, para la atención a los alumnos en régimen de tutorías. Para el personal docente a tiempo completo, se establecen 6 horas semanales de tutorías. Esta acción permitirá complementar el proceso de aprendizaje con una actividad individualizada.

Dejando aparte la legalidad, es una tradición universitaria el hecho de que los estudiantes vayan a hablar con el profesor de la asignatura para aclarar dudas, comentar aspectos relativos a la asignatura, pedir consejo sobre bibliografía, etc. Este tiempo de dedicación es de gran importancia, dado que en él se establece el contacto más personal entre el profesor y el alumno. Las primeras veces que el alumno acude a tutorías se siente cohibido, por lo que hay que facilitar al máximo el diálogo, procurando que se cree un clima distendido. Por lo general, los alumnos acuden individualmente o en pequeños grupos, lo que potencia las posibilidades de mantener una relación más personal que anime al alumno a repetir la experiencia cuando lo crea conveniente.

Aunque toda esta teoría acerca de la misión y objetivos de una tutoría está clara, realmente el uso que los estudiantes realizan de las tutorías es mínimo salvo hasta la semana anterior al examen o a la entrega de memorias de prácticas (cuando quizá ya no pueden aprovecharse todas las ventajas que brinda esta figura).

Las tutorías son de gran importancia para el profesor porque mediante ellas puede conocer cómo se va asentando la asignatura y si se van cumpliendo las expectativas que tenía planificadas. Es por tanto imprescindible que el profesor no desista en su empeño y que comunique constantemente la existencia de las tutorías y motive a los estudiantes a hacer uso de las mismas.

## 4.8 La evaluación

La evaluación, en su doble dimensión de apreciación de lo aprendido y de certificación de las habilidades alcanzadas, constituye otro eslabón esencial de la acción docente universitaria.

Los exámenes deben cumplir condiciones de seguridad, objetividad y eficacia para garantizar una valoración justa del esfuerzo realizado por cada estudiante y su grado de asimilación de la asignatura. Entre los tipos de exámenes más extendidos, destacan los siguientes:

- Examen oral:

El examen oral es un sistema de evaluación que permite un cierto grado de libertad tanto al estudiante como al profesor, en la medida en que existe una mayor interacción entre los dos, y su desarrollo puede ser flexible, dado que las preguntas pueden adaptarse al propio desarrollo de la prueba. En ese sentido, pueden permitir obtener una visión amplia y objetiva de los conocimientos del estudiante. Sin embargo, su principal inconveniente es la gran cantidad de tiempo que consumen. En las condiciones de masificación de la Universidad actual, son casi irrealizables, salvo para grupos muy reducidos. Por otra parte, hay que tener en cuenta que la personalidad de los alumnos (tímida o extrovertida) puede influir decisivamente en su calificación.

- Examen escrito:

Son los exámenes tradicionales en los que se propone al estudiante una serie de preguntas, desarrollo de algún tema o resolución de problemas. Es el método de evaluación más generalizado. En mi opinión debe evitarse planteamientos en los que las pruebas se reduzcan a evaluar la capacidad memorística de los alumnos, siendo más idóneo juzgar su capacidad de integrar, razonar y plasmar los conocimientos adquiridos.

- Examen tipo test:

En este tipo de exámenes, el alumno debe elegir la respuesta correcta a una pregunta entre una lista de posibilidades. Su principal ventaja consiste en que son fáciles de corregir con objetividad. Estos exámenes exigen una cuidadosa construcción, que requiere tiempo e ingenio. Si no se elaboran correctamente, se puede caer en el error de evaluar únicamente el volumen de información que el alumno no posee, y no su grado de comprensión. Otro inconveniente importante es que no son adecuados para evaluar aspectos como la capacidad de utilización correcta del lenguaje matemático, la capacidad de analizar correctamente en términos físicos una situación dada, etc. Estos inconvenientes pueden paliarse incluyendo en el examen el desarrollo completo de algún problema, o permitiendo la posibilidad de que el alumno pueda incluir un razonamiento sobre la elección realizada en cada pregunta.

A la vista de las distintas opciones de evaluación y de sus características, está claro que los diferentes tipos de clase deben evaluarse de modo diferente.

Los conocimientos teóricos se prestan más a ser evaluados mediante examen escrito, examen tipo test o una combinación de los dos. En general para la evaluación del material impartido en las clases de teoría de las tres asignaturas utilizo exámenes de cuestiones (no de desarrollo memorístico de puntos del temario). En estas cuestiones los estudiantes deben relacionar conceptos o hacer alguna pequeña demostración.

En el caso particular de *Psicofísica de la Visión* se incluye alguna cuestión numérica (10 ó 15 % del total) relacionada con los problemas sobre colorimetría triestímulo que se han tratado en clase.

El trabajo en las sesiones prácticas se evalúa de forma diferente en función de su diferente carácter.

Las prácticas de *Psicofísica* de carácter netamente experimental se evalúan mediante una memoria de prácticas en la que se valora la capacidad de análisis de la información obtenida en la práctica y el sentido crítico respecto de los resultados obtenidos. Este tratamiento se aplica también a las sesiones experimentales de las prácticas de *Colorimetría* (prácticas 1 y 2).

La evaluación de las sesiones prácticas de ejercicios por ordenador se evalúan de forma diferente. En cada práctica se plantea a los alumnos un conjunto de cuestiones que deben resolver (una especie de boletín de problemas a resolver con las técnicas vistas en esa práctica). La solución de estos problemas o cuestiones (memoria de resultados) es el material que se evalúa para obtener la nota de estas sesiones.

En el caso de *Colorimetría y Visión del Color* no se les exige esta memoria de resultados en las prácticas en las que se va introduciendo COLORLAB para resolver problemas sencillos. En estas primeras prácticas los alumnos finalizan el trabajo en el aula bajo la supervisión individualizada del profesor. Solamente deben entregar esta memoria de resultados en la última de las prácticas (la más larga y aquella en la que se proponen problemas más complejos que integran los anteriores).

En función de cual sea el nivel en el uso de MATLAB que puedan adquirir debido a su uso en la asignatura de *Matemáticas*, podremos plantear de forma voluntaria para los alumnos más aventajados la elaboración de pequeños programas para la solución de algún problema o la ilustración de algún efecto.

En cuanto a los resultados, los Estatutos de la UVEG garantizan a los estudiantes su derecho a la revisión de exámenes. Una actitud abierta y autocrítica por parte del profesor debería ser suficiente para desarrollar en los estudiantes el hábito de autoevaluarse y evitar conflictos en la interpretación de los resultados de los exámenes.

Yo creo que la existencia de esta posibilidad de revisión de exámenes o reclamaciones, da seguridad a los estudiantes (saben que podrán comprobar sus trabajos y exámenes e incluso hacer reclamaciones sin por eso molestar o agra-

viar a sus profesores) y también nos da tranquilidad a nosotros mismos (pues sabemos que, caso de que nos hayamos equivocado o de que nos hayamos decantado por una alternativa u otra en caso de duda, siempre podemos volvernos atrás y hacerlo sin quedar mal, pues para eso está justamente la fase de revisión).

Por último me gustaría señalar que los Estatutos de la Universitat de València considera la evaluación de la docencia del personal docente e investigador, siendo necesaria la opinión de los estudiantes. Para ello creó, por aprobación del Claustro 17/11/1987, una Comisión de Evaluación, que gestionara los procedimientos de evaluación pertinentes.

Si bien hasta el momento, las encuestas a realizar por los estudiantes para evaluar la labor docente del profesorado eran anuales, en la actualidad, por acuerdo de la Junta de Gobierno del 23/10/2001, la docencia del profesorado puede arbitrarse por periodos quinquenales. Este acuerdo surge como solución a la multiplicación exponencial de encuestas y en bien del ahorro en el procesamiento de toda esa información.

## 4.9 Reflexiones sobre la viabilidad del proyecto

La importancia que concedo a la aplicación cuantitativa de los modelos para obtener resultados numéricos y las ventajas de las herramientas informáticas disponibles en la actualidad (que posibilitan la obtención de estos resultados con poco esfuerzo analítico por parte de los alumnos) ha hecho que plantee una concentración de la fenomenología en *Psicofísica* y en *Colorimetría*, habiendo orientado *Percepción* al estudio de los modelos cuantitativos que se apoyan en el uso del ordenador.

Esta manera de organizar el contenido representa un cambio relativo respecto de lo que veníamos haciendo hasta ahora, donde se cubrían más aspectos particulares de la fenomenología (también en *Percepción*), y no se abordaba ninguna aplicación cuantitativa en todo el campo de la visión espacio-temporal (tan sólo usábamos MATLAB -COLORLAB- en *Colorimetría*).

Como he ido explicando en este capítulo y en el anterior, considero que es un experimento que merece la pena hacer para dotar de carácter predictivo (no sólo descriptivo) a la parte de visión espacial. No en vano contamos con una cierta libertad para hacer esto porque el contenido básico (la fenomenología) que necesitan las asignaturas aplicadas ya se cubre en *Psicofísica* y parte de la *Colorimetría*. Pero esta no es una opinión *cerrada* porque soy consciente de los riesgos que entraña.

Como comentaba en el capítulo anterior, a pesar del éxito relativo que hemos tenido en *Colorimetría*, esta extensión es un riesgo porque la complejidad conceptual de la visión espacial es mayor, y la correcta asimilación de estos conceptos dependerá en gran medida del éxito que tenga el uso de MATLAB en la asignatura *Matemáticas*, y que mediante ese uso, los estudiantes vean que pueden *utilizar* MATLAB en vez de *sufrirlo*.

En cualquier caso, he de resaltar que la organización de estas asignaturas es una tarea de equipo, y nos planteamos volver a una exposición más tradicional (sin complemento cuantitativo) si la experiencia no tiene éxito, aunque ello suponga como dije una cierta *desnaturalización* de la materia.

# Bibliografia

- [1] F. García and M. Fortea. *Docència Universitària: Avanços Recents*. Universitat Jaume I, Castelló, 2001.
- [2] J. Higbie. Seeking the Holy Grail of teaching. *The Physics Teacher*, 38:124, 2000.
- [3] D.H. Kelly. Motion and vision II: Stabilized spatiotemporal threshold surface. *Journal of the Optical Society of America*, 69(10):1340–1349, 1979.
- [4] M.D. Fairchild. *Color Appearance Models*. Addison-Wesley, New York, 1997.
- [5] A.B. Watson and J. Solomon. *Psychophysica (Psychometrica, Quest and Cinematica): Psychophysics Software in Mathematica*. Disponible en <http://vision.arc.nasa.gov/mathematica/psychophysica/>. NASA Ames Research Center, 1997.
- [6] D.H. Brainard. The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10:433–436, 1997. Disponible en <http://color.psych.ucsb.edu/psychophysics/>.
- [7] D.G. Pelli. Videotoolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10:437–442, 1997. Disponible en <http://rajsky.psych.nyu.edu/videotoolbox/>.
- [8] J. Malo and M.J. Luque. *COLORLAB: A Color Processing Toolbox for MATLAB*. Disponible en <http://taz.uv.es/~jmalo>, Universitat de València, 2002.
- [9] E.P. Simoncelli. *MatlabPyrTools: MATLAB code for multi-scale cortical image representations*. Disponible en <http://www.cns.nyu.edu/~lcv>, New York University, 1997.



## Capítulo 5

# Programación por Asignaturas

En este capítulo se desarrollan en detalle los contenidos teóricos y prácticos de las asignaturas incluidas en el perfil en el orden en el que serán cursadas por los alumnos:

- Psicofísica de la Visión (troncal, 2<sup>o</sup> curso).
- Colorimetría y Visión del Color (optativa, 2<sup>o</sup> curso).
- Percepción Visual (troncal, 3<sup>er</sup> curso).

En cada caso la exposición se inicia con un cuadro sinóptico que recoge la información más relevante de la asignatura:

- Descripción básica: carácter de la asignatura, ubicación de la asignatura en la titulación, créditos, descriptores BOE y materia donde está incluida.
- Objetivos.
- Temario, descrito a nivel de bloques temáticos e incluyendo el tiempo dedicado al desarrollo de cada bloque.
- Bibliografía básica.
- Método de evaluación.
- Interacción con asignaturas previas: conocimientos requeridos para abordar la asignatura.
- Interacción con asignaturas posteriores: uso de los conocimientos adquiridos en otras asignaturas.

Los cuadros sinópticos sólo recogen las interacciones *básicas*, y la bibliografía (manuales fundamentales) se da de forma abreviada. Para una relación más completa (y comentada) de las interacciones, véase la sección 2.2. La bibliografía exhaustiva que incluye estas referencias completas y materiales más específicos se da al final de este capítulo. Los manuales se comentan en el capítulo 6 dedicado a la bibliografía.

Después del cuadro sinóptico, se hace una descripción general de las diferentes unidades temáticas para transmitir la imagen global de la asignatura. A continuación se expone tema a tema los contenidos teóricos y se da la bibliografía adecuada para cada capítulo. Por último se describen las sesiones prácticas y su relación con la teoría. Al final de este capítulo, tras la exposición de las tres asignaturas, se lista el material bibliográfico al que se va haciendo referencia en los distintos apartados.

## 5.1 Psicofísica de la Visión

### 5.1.1 Cuadro Sinóptico

PSICOFÍSICA DE LA VISIÓN
<p>CARÁCTER: Troncal          CRÉDITOS: 4.5 teóricos + 1.5 prácticos          UBICACIÓN: Tercer semestre (Primer semestre del segundo curso)          MATERIA BOE: Estructura y Función del Sistema Visual.          DESCRIPTORES BOE: El ojo como receptor de energía radiante. El sistema visual como integrador de sensaciones.</p>
OBJETIVOS
<p>El objetivo de la asignatura <i>Psicofísica de la Visión</i> es presentar la fenomenología de la percepción visual que se obtiene mediante métodos psicofísicos, así como iniciar al alumno en el uso de dichos métodos.</p>
TEMARIO (bloques temáticos y sesiones prácticas)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sesiones teóricas (45 horas)             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Estímulos y percepciones (2 temas, 6 horas)</li> <li>– Luminosidad (2 temas, 4 horas)</li> <li>– Color (3 temas, 13 horas)</li> <li>– Textura (espacio-temporal) (4 temas, 15 horas)</li> <li>– Movimiento (2 temas, 4 horas)</li> <li>– Integración de alto nivel (2 temas, 3 horas)</li> </ul> </li> <li>• Sesiones prácticas (15 horas, 3 horas/sesión)             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Práctica 1: Métodos psicofísicos de igualación.</li> <li>– Práctica 2: Limitaciones de la luminancia.</li> <li>– Práctica 3: Colorimetría triestímulo.</li> <li>– Práctica 4: Funciones de Sensibilidad al Contraste.</li> <li>– Práctica 5: Umbral de coherencia en el movimiento.</li> </ul> </li> </ul>
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA
<p>Artigas 95 [1]    Wandell 95 [2]    Fairchild 97 [3]    Capilla 02 [4]          Schwartz 99 [5]    Spillmann 90 [6]    Boff 86 [7]</p>

EVALUACIÓN
<p>La evaluación del rendimiento del alumno se consigue ponderando diferentes factores, relacionados con el peso relativo de las sesiones teóricas y prácticas de la asignatura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocimientos teóricos (75% de la nota).</li> <li>• Trabajo en el laboratorio (25% de la nota).</li> </ul> <p>Los conocimientos teóricos se evalúan mediante un examen y se complementan con notas obtenidas por los alumnos por la resolución voluntaria de problemas en clase. El examen consta de una parte de cuestiones teóricas (85 %) y una parte de problemas de aplicación numérica (15 %).</p> <p>El trabajo en el laboratorio se evalúa mediante la presentación de una memoria de prácticas, donde se valora la corrección en la presentación de resultados experimentales y la iniciativa del alumno en el análisis de los datos y la extracción de conclusiones.</p>
INTERACCIONES CON ASIGNATURAS PREVIAS (Ver Fig. 2.1)
<p><b>Matemáticas</b> (troncal, primer y segundo semestres): Fundamental para adquirir desenvoltura en el manejo del lenguaje matemático.</p> <p><b>Neurofisiología de la Visión</b> (troncal, primer semestre): Útil para contrastar el conocimiento del proceso visual que puede obtenerse mediante métodos psicofísicos y métodos fisiológicos.</p> <p><b>Fotometría Ocular</b> (optativa, segundo semestre): Aunque esta asignatura no resulta crucial, es conveniente por que en ella los alumnos se enfrentan por primera vez al problema de describir numéricamente un parámetro perceptual (la luminosidad) a partir de la descripción física del estímulo (la radiancia). Las limitaciones del descriptor obtenido (la luminancia) son objeto de <i>Psicofísica</i>.</p>
INTERACCIONES CON ASIGNATURAS POSTERIORES (ver Fig. 2.1)
<p><b>Percepción Visual</b> (troncal, quinto semestre): El estudio de los modelos presentados en <i>Percepción Visual</i> depende del conocimiento previo de la fenomenología de la percepción presentada en <i>Psicofísica</i>.</p> <p><b>Optometría II y III</b> (troncales, cuarto y quinto semestre), y <b>Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico</b> (optativa, sexto semestre): En estas asignaturas se ejercita al alumno en el uso de métodos de diagnóstico de anomalías visuales que tienen su fundamento en el comportamiento del sistema visual presentado en <i>Psicofísica</i>, y hacen uso de las técnicas experimentales básicas tratadas en esta asignatura.</p> <p><b>Colorimetría y Visión del Color</b> (optativa, cuarto semestre): En <i>Psicofísica</i> se presenta la teoría trístimulo que es requisito previo para el estudio de modelos de apariencia del color y las aplicaciones tecnológicas tratadas en <i>Colorimetría</i>.</p>

### 5.1.2 Descripción de los bloques temáticos

El objetivo de la asignatura *Psicofísica de la Visión* es presentar la fenomenología de la percepción visual que se obtiene mediante métodos psicofísicos, así como iniciar al alumno en el uso de dichos métodos.

La asignatura consta de dos partes que se desarrollan en paralelo: 45 sesiones de teoría (45 horas) y 5 sesiones de laboratorio (15 horas). La materia teórica se organiza en 6 bloques temáticos.

- Bloque 1: Estímulos y percepciones
  - Tema 1: Variables físicas y variables perceptuales.
  - Tema 2: Respuesta de un detector.
- Bloque 2: Luminosidad
  - Tema 3: Energía y luminosidad: Luminancia.
  - Tema 4: Limitaciones de la luminancia como descriptor de la luminosidad.
- Bloque 3: Color
  - Tema 5: El color como vector. Fenomenología básica de la percepción de colores no relacionados.
  - Tema 6: Colorimetría triestímulo.
  - Tema 7: Profundización en la fenomenología de la percepción de colores no relacionados.
- Bloque 4: Texturas (patrones espacio-temporales)
  - Tema 8: Texturas y patrones periódicos.
  - Tema 9: Respuesta frecuencial del sistema visual.
  - Tema 10: Detectores de frecuencia y orientación.
  - Tema 11: Visión de estímulos puntuales y breves.
- Bloque 5: Movimiento
  - Tema 12: Estímulos en movimiento. Flujo óptico.
  - Tema 13: Introducción a la fenomenología de la percepción de movimiento.
- Bloque 6: Integración de alto nivel.
  - Tema 14: Medidas de distorsión.
  - Tema 15: Segmentación y Gestalt.

En el primero de ellos, de carácter introductorio, se reflexiona sobre el proceso visual, la naturaleza de las variables perceptuales, y se introduce una serie de conceptos elementales sobre sistemas de detección. En los cuatro siguientes, se cubren los aspectos básicos de la visión de bajo nivel: luminosidad, color, textura y movimiento. En el último se presentan ejemplos de integración de alto nivel a partir de las primitivas de bajo nivel.

### Bloque 1: Estímulos y Percepciones

La intención de este bloque introductorio es identificar el objeto y nivel de resolución de nuestro estudio dentro del proceso visual y presentar una serie de conceptos básicos relativos a la caracterización de detectores. Estos conceptos serán utilizados tanto en esta asignatura como en *Colorimetría y Percepción*.

El interés de nuestro estudio se centrará en la caracterización de las dimensiones perceptuales de los estímulos y en la caracterización de la respuesta de los mecanismos que dan lugar a esas percepciones.

Nos restringiremos a los aspectos sensoriales de bajo nivel: nuestra aproximación será *de-abajo-a-arriba*<sup>1</sup>, no considerando la influencia de aspectos cognitivos *de-arriba-a-abajo*.

Además de identificar el objeto de estudio, en el primer tema del bloque. '*El Proceso Visual, Variables Físicas y Variables Perceptuales*', se presentan los paradigmas experimentales básicos para la descripción perceptual de los estímulos. En el segundo tema del bloque, '*Respuesta de un Detector*', se introducen los conceptos generales para la caracterización de un detector y los métodos experimentales para la determinación de su respuesta.

Se hace énfasis en la expresión formal de las relaciones entre respuesta, umbrales incrementales y sensibilidad, y se generalizan los conceptos de umbrales incrementales y medida de distancias a casos multidimensionales, donde el estímulo está representado por la respuesta de más de un detector.

### Bloque 2: Luminosidad

La *luminosidad* es la percepción por la cual un estímulo parece emitir (o reemitir) más o menos energía.

En el primer tema del bloque, '*Energía y Luminosidad: Luminancia*', destinado a los alumnos que no hayan cursado *Fotometría Ocular e Iluminación*, se presenta el concepto de *luminancia*, obtenido a partir de la radiancia y la función de sensibilidad espectral,  $V_\lambda$ , con la suposición de Abney de aditividad sobre longitudes de onda.

En el segundo tema del bloque, '*Limitaciones de la Luminancia como Descriptor de la Luminosidad*', se habla en primer lugar de las no linealidades de la respuesta a luminosidades (leyes de Weber y Stevens), y después se resalta el efecto del entorno sobre la percepción de luminosidad de un test.

---

<sup>1</sup>Traducción (más o menos afortunada) de la expresión inglesa *bottom-up approach*.

Este es el primer ejemplo en el que los estudiantes se enfrentan con la percepción de un estímulo relacionado (visto en un entorno) lo cual da paso al concepto de *claridad*.

### Bloque 3: Color

El *color* es el aspecto perceptual que permite distinguir un estímulo de otros de igual área, duración, forma y textura.

En el primer tema del bloque, '*El Color como Vector*', después de reflexionar sobre la influencia del entorno en la percepción del color y definir sus dimensiones perceptuales en los casos de *colores relacionados* y *colores no relacionados*, nos centramos en las experiencias de igualación de colores no relacionados (la percepción de estímulos relacionados se trata con mayor profundidad en *Colorimetría* y lateralmente en *Percepción*). La conclusión es que la percepción cromática de los estímulos no relacionados puede caracterizarse como un vector.

El segundo tema, '*Colorimetría Triestímulo*', relaciona los vectores triestímulo con la radiación que proviene de los objetos y plantea descriptores del tono, el colorido y la luminosidad a partir de los vectores triestímulo: las coordenadas cromáticas y la luminancia, y la longitud de onda dominante, la pureza y la luminancia. Además se deducen las expresiones para obtener estos parámetros en cualquier sistema de primarios.

En el tercer tema del bloque, '*Profundización en la Fenomenología de la Percepción de Colores No Relacionados*', se trata el tema de la codificación oponente del color, la medida de distancias en el espacio triestímulo, y se muestran efectos que revelan las limitaciones de los modelos lineales de representación del color.

### Bloque 4: Texturas (patrones espacio-temporales)

En el primer tema de este bloque, '*Textura y Patrones Periódicos*', el concepto de textura se relaciona con la existencia de periodicidades espaciales (y eventualmente temporales) en las imágenes. Esto da pie a la introducción elemental del análisis de Fourier tanto para caracterizar a las texturas como para caracterizar el comportamiento del sistema ante las mismas. En este tema se prima la comprensión intuitiva del significado del dominio de Fourier, dejando para la asignatura de *Percepción Visual* un estudio más exhaustivo de la conveniencia de utilizar determinada representación para imágenes y sistemas.

En el tema siguiente, '*Respuesta Frecuencial del Sistema Visual*', se analiza el aspecto de las redes espacio-temporales acromáticas y cromáticas, y se presentan los resultados empíricos sobre los umbrales de detección de contrastes estas redes.

En el tercer tema del bloque, '*Detectores de Frecuencia y Orientación*', se presentan las evidencias que indican la existencia de detectores con respuesta selectiva a una banda estrecha de frecuencias y orientaciones. Así mismo se describe la distribución de este tipo de detectores en el dominio de Fourier y su respuesta no-lineal.

Para finalizar, en el último tema del bloque, '*Visión de Estímulos Puntuales y Breves*', analizamos las consecuencias de la caracterización como filtro presentada en los temas anteriores (agudeza visual y frecuencias críticas de fusión) y algunas particularidades de la visión de estos estímulos, concretamente las propiedades de sumación espacial y temporal.

### **Bloque 5: Movimiento**

En el primer tema de este bloque, '*Estímulos en Movimiento: Flujo Óptico*', se hace una reflexión sobre las aproximaciones posibles al estudio de la percepción de movimiento (considerando o sin considerar la interpretación previa de la escena). En nuestro caso, nos limitaremos al estudio del movimiento previo al análisis de la escena, la detección de desplazamientos 2D en el plano imagen: el flujo óptico. Se analiza la utilidad de la información del flujo para segmentación y navegación y se plantean las ecuaciones del flujo en los dominio espacial y frecuencial.

En el segundo tema de este bloque, '*Introducción a la Fenomenología de la Percepción del Movimiento*', revisamos los resultados fundamentales obtenidos con estímulos de puntos aleatorios y redes sinusoidales. Los primeros ponen de manifiesto los desplazamientos máximos permitidos para detectar correlación entre los puntos, y los segundos que ponen de manifiesto el problema de la apertura. También se tratan aquí post-efectos debidos a la saturación de los detectores de movimiento.

### **Bloque 6: Integración de percepciones**

Este bloque está compuesto de dos temas que tocan el tema de la integración de percepciones desde dos perspectivas opuestas.

En el primero de los mismos, '*Medidas de Distorsión*', seguimos con la aproximación *de-abajo-a-arriba* aplicada durante todo el curso, para tratar el tema del cálculo de distancias perceptuales ponderando las diferencias en las respuestas de diferentes detectores, lo cual es en realidad una integración de muy bajo nivel.

El segundo tema de este bloque, el último del curso, '*Segmentación y Gestalt*', es en realidad una charla sobre ejemplos de fenómenos relacionados con la interpretación de escenas, difícilmente abordables desde la perspectiva de bajo nivel empleada en el curso. Estudios empíricos han identificado ciertas reglas de agrupación utilizadas por el sistema visual para resolver tareas de segmentación e interacciones curiosas entre diferentes claves visuales.

### **Sesiones de Laboratorio**

El objetivo de las sesiones de laboratorio es que el alumno, mediante su uso práctico, conozca las principales técnicas psicofísicas para la medida de variables perceptuales.

Así mismo, las magnitudes y comportamientos medidos en las sesiones de laboratorio sirven para ilustrar algunos de los conceptos introducidos en las sesiones teóricas facilitando su comprensión.

Debido a lo limitado de los créditos prácticos, hemos incluido una sola práctica de los bloques temáticos más importantes (todos excepto el último, que tiene menor entidad):

- Práctica 1 (bloque 1, Estímulos y Percepciones):  
Métodos psicofísicos de igualación.
- Práctica 2 (bloque 2, Luminosidad):  
Limitaciones de la luminancia: no-linealidades e inducción.
- Práctica 3 (bloque 3, Color):  
Colorimetría triestímulo.
- Práctica 4 (bloque 4, Textura):  
Funciones de Sensibilidad al Contraste.
- Práctica 5 (bloque 5, Movimiento):  
Umbral de coherencia en el movimiento.

Aunque todas estas prácticas requieren de ordenadores para la generación y presentación de los estímulos, se trata de prácticas estrictamente experimentales (no numéricas). En ellas lo importante es dominar las técnicas de medida más que el análisis computacional de los estímulos o modelos.

### 5.1.3 Desarrollo de los contenidos (teoría)

---

Bloque 1:	<i>Estímulos y Percepciones</i>
TEMA 1:	EL PROCESO VISUAL. VARIABLES FÍSICAS Y VARIABLES PERCEPTUALES
Tiempo aproximado:	<i>3 horas</i>

---

- 1.1 El proceso de la visión.
  - 1.2 Niveles de análisis del proceso: problemas computacionales, problemas algorítmicos e implementación.
  - 1.3 Niveles de abstracción en visión: bajo nivel y alto nivel. Ámbito de la psicofísica.
  - 1.4 Descripción física y descripción perceptual de un estímulo.
  - 1.5 Paradigmas experimentales para la definición de variables perceptuales.
    - 1.5.1 Experiencias de igualación simétricas y asimétricas: estímulos relacionados y no relacionados.
    - 1.5.2 Experiencias de cancelación.
    - 1.5.3 Experiencias de estimación de la magnitud.
- 

Este tema se inicia con una reflexión sobre los objetivos y elementos fundamentales del proceso de la visión, así como las diferentes aproximaciones a su estudio.

En primer lugar, se presenta la percepción visual como el proceso de extracción de información a partir de la distribución de energía radiante en el plano de fotodetección para realizar una interpretación de la escena: realizar tareas de segmentación, clasificación y (a más alto nivel), elaboración de conceptos.

Siguiendo las ideas de Marr, es posible analizar el proceso visual a varios niveles de resolución. Mediante un ejemplo concreto de clasificación se presentan las diferencias entre los *aspectos computacionales*, los *aspectos algorítmicos* y los *aspectos de implementación* que se pueden considerar para entender el proceso de la visión.

Además de estas distintas aproximaciones al problema, se introducen los conceptos de visión de *bajo nivel* y visión de *alto nivel*, en función del nivel de abstracción y la proximidad a los datos de entrada.

Es aquí cuando definimos el ámbito de actuación en el que se centrará el grupo de asignaturas formado por *Psicofísica de la Visión*, *Percepción Visual* y *Colorimetría y Visión del Color*: nos restringiremos a los fenómenos de bajo

nivel (luminosidad, color, textura y movimiento), que pueden entenderse mediante transformaciones sencillas de los datos capturados por el mosaico de fotorreceptores.

Nuestra única incursión en aspectos de más alto nivel se limitará al cálculo de distorsiones integrando estas primitivas de bajo nivel, y la muestra de unos cuantos efectos que ponen de manifiesto la insuficiencia de las explicaciones de bajo nivel.

A pesar de las limitaciones que supone la restricción a los fenómenos de bajo nivel, se resalta el hecho de que este nivel de abstracción es más adecuado para plantear experimentos precisos y modelos cuantitativos.

Una vez centrado el ámbito de nuestro estudio, el resto del tema se dedica a la distinción entre estímulo y percepción y a dar una introducción a los métodos psicofísicos para la caracterización numérica de la percepción.

En primer lugar se hace hincapié en la diferenciación entre la descripción física de un estímulo (mediante variables radiométricas, geométricas o dinámicas) y su descripción perceptual (atendiendo a los atributos mediante los que los observadores diferencian los estímulos). Se introduce aquí el concepto de *metamerismo* (generalizado): diferentes estímulos físicos pueden dar lugar a la misma percepción.

El objetivo de nuestro estudio es la elaboración de modelos que, a partir de la descripción física, permitan obtener descriptores que reproduzcan el comportamiento de los atributos perceptuales.

A continuación se presenta el paradigma de la igualación para describir cuantitativamente la percepción mediante los parámetros físicos que es necesario fijar para reproducir la percepción de un estímulo dado.

Se diferencia entre *igualaciones simétricas* e *igualaciones asimétricas* (o equivalentemente entre *estímulos aislados* y *estímulos relacionados*) para poner de manifiesto que el efecto del entorno espacio-temporal modifica la percepción de un estímulo.

Esta distinción es importante porque, dos estímulos (física o perceptualmente) iguales en el caso aislado pueden percibirse como distintos en el caso relacionado. En este caso, la dimensionalidad de un estímulo relacionado crece respecto del caso aislado porque hay que fijar más parámetros en el entorno (es necesario incluir la descripción del entorno).

Los métodos de *cancelación* están relacionados con (son una variante de) los métodos de igualación salvo que en este caso la percepción queda caracterizada por los parámetros físicos que hay que fijar para anular la percepción (en lugar de para generarla).

La relación entre variables físicas y variables perceptuales puede hallarse también mediante experiencias de *estimación de la magnitud*. En este caso, en lugar de definir la percepción mediante los valores de ciertas magnitudes físicas (de igualación o cancelación), se utilizan directamente los valores proporcionados por los observadores que describen la intensidad de un cierto atributo perceptual

(p. ej. la luminosidad) en función de un parámetro físico (p.ej. la radiancia o la luminancia).

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Capítulo 1

Marr 80 [8], Capítulo 1

Fairchild 97 [3], Capítulos 2, 4 y 7

---

---

Bloque 1: *Estímulos y Percepciones*

TEMA 2: RESPUESTA DE UN DETECTOR

Tiempo aproximado: *3 horas*

---

2.1 Estímulo y respuesta. Respuesta lineal y no lineal.

2.2 Naturaleza probabilística de la respuesta.

2.3 Umbral absoluto y umbral incremental.

2.3.1 Definiciones.

2.3.2 Métodos psicofísicos para la medida de umbrales y la realización de igualaciones.

2.4 Sensibilidad y resolución.

2.5 Determinación psicofísica de funciones respuesta.

2.5.1 Mediante umbrales incrementales.

2.5.2 Mediante estimación de la magnitud.

2.6 Umbrales incrementales en representaciones multidimensionales.

2.7 Distancias perceptuales entre estímulos.

2.7.1 Distancia euclídea.

2.7.2 Distancia no euclídea: métrica del espacio.

2.7.3 Métrica del espacio, sumación y forma de los umbrales incrementales.

2.8 Descripción de la influencia del entorno y las no linealidades: saturación, adaptación, inducción y enmascaramiento.

---

En este tema se introducen de forma genérica los conceptos necesarios para la caracterización de la respuesta de un detector. Los conceptos presentados aquí se usarán de forma recurrente en multitud de ocasiones, tanto en este curso, como en *Percepción* y en *Colorimetría*.

Esto es así porque la suposición básica en el estudio de la percepción visual es que los atributos perceptuales (variables perceptuales) a los que hace referencia el tema 1 provienen de la existencia de ciertos detectores (mecanismos) sensibles a dichos atributos. El objetivo de nuestro estudio es caracterizar la respuesta de dichos mecanismos para obtener descriptores de los atributos.

En primer lugar, se incide en el hecho de que, como en todo proceso de medida, la respuesta (lineal o no lineal) de los detectores no es determinista, sino que está afectada de un ruido. Este ruido puede provenir tanto de oscilaciones en la definición física del estímulo, como de oscilaciones en la señal dada por el detector (ruido interno). Al final (asumiendo un estímulo determinista) la función respuesta quedará definida por una parte determinista más una componente aleatoria de una cierta anchura (varianza).

A continuación se definen los conceptos de *umbral absoluto* y *umbral diferencial* o *incremental*, y se relacionan con la pendiente de la respuesta (determinista) en el origen o para cualquier nivel de estimulación. La existencia de dichos umbrales se debe a la imposibilidad de resolver estímulos muy similares debido al ruido en la respuesta o a la resolución limitada de los mecanismos de análisis de la respuesta de los detectores.

Debido a su importancia para la caracterización de estímulos por igualación y para la estimación de las respuestas se presentan los métodos psicofísicos para la realización de igualaciones y la medida de umbrales: *método de los estímulos constantes*, *método de los límites* y *método de los ajustes*.

Es importante que los alumnos comprendan que debido a la naturaleza probabilística de la respuesta los valores de las igualaciones no son siempre los mismos, y en el caso de umbrales, estos no son deterministas, sino que existe una probabilidad no nula de detección o discriminación por debajo del umbral y una probabilidad menor que uno por encima. Se deduce la relación entre la probabilidad de detección (o discriminación) y la varianza del ruido en la respuesta, y de ahí se deduce la forma de la probabilidad de función psicométrica sigmoide.

Los alumnos manejarán estos métodos en el laboratorio (práctica 1) en el caso concreto de la caracterización de luminosidades mediante igualación.

Después se define la resolución en el espacio del estímulo mediante la derivada de la respuesta y se define la sensibilidad como proporcional a dicha derivada: el sistema es más sensible en las regiones donde la respuesta crece más rápido en función del estímulo. De esta manera la sensibilidad resulta inversa a los umbrales.

Según lo anterior, es posible determinar psicofísicamente la variación local de la respuesta mediante la medida de umbrales incrementales. Si la respuesta es integrable, es decir, si sumando los incrementos locales seguimos teniendo una respuesta con sentido perceptual, es posible determinar completamente la curva de respuesta exclusivamente a partir de la medida de umbrales.

Un método alternativo para obtener la respuesta es la utilización de técnicas de estimación de la magnitud. A pesar del uso de referencias para orientar al observador en la estimación de la magnitud, las técnicas basadas en umbrales tienen menos varianza porque la tarea experimental para el observador, no implica tomar ningún criterio subjetivo para valorar la intensidad del estímulo:

sólo tiene que responder si ve o no ve las diferencias.

Una vez presentados los conceptos para funciones respuesta unidimensionales, se generalizan para varias dimensiones. En este caso las regiones de discriminación o mínimas diferencias perceptibles, pasan a ser *elipsoides*, y la sensibilidad es la inversa del volumen de estos elipsoides.

En relación con lo anterior, los umbrales pueden definirse alternativamente a partir de una medida de distancia perceptual en el dominio del estímulo: los elipsoides de discriminación son el lugar geométrico de los puntos que equidistan perceptualmente de uno dado. La medida de distancia es una función en la que se suman las distorsiones producidas en cada dimensión del estímulo.

Aquí se recuerda el concepto de métrica, estudiado por los alumnos en *Matemáticas*, y se distingue entre métricas euclídeas y no euclídeas.

Se ve que, en función de los pesos aplicados a las distintas dimensiones, de la existencia de interacciones entre ellas y del orden de sumación, el tamaño y el aspecto (orientación y convexidad) de los elipsoides cambia sustancialmente. Por ello, a partir de las medidas de umbrales incrementales multidimensionales se puede deducir la función distancia.

Los conceptos de sumación y medida de distancias se ilustrarán con ejemplos en el tema 11 (sumación espacial y temporal), y más propiamente en los temas 7 y 14 (medida de distancias en el espacio de color, y suma de distorsiones en diferentes mecanismos de detección, respectivamente).

Para finalizar el tema, se introducen los conceptos de saturación, adaptación, enmascaramiento e inducción ligándolos a las no linealidades de la respuesta o a su modificación debido a la presencia de otros estímulos en el entorno espacio-temporal.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Apéndice 2  
Coren 99 [9], Capítulo 2  
Boff 86 [7], Capítulo 7  
Romero 96 [10], Capítulo 8  
Schwartz 99 [5], Capítulo 11  
Fairchild 97 [3], Capítulo 2

---

Bloque 2: *Luminosidad*

TEMA 3: ENERGÍA Y LUMINOSIDAD: LUMINANCIA

Tiempo aproximado: *2 horas*

---

3.1 Que es la luminosidad?

3.2 La radiancia no describe adecuadamente la sensación de luminosidad.

3.3 Primera aproximación a la descripción de la luminosidad: Luminancia.

3.3.1 Suposición de detección lineal: ley de Abney.

3.3.2 Función de sensibilidad espectral,  $V_\lambda$ .

3.3.3 Luminancia,  $Y$ .

3.4 Magnitudes y unidades radiométricas y fotométricas.

---

El objetivo fundamental del tema es introducir el concepto de luminancia a los alumnos que no han cursado la asignatura optativa *Fotometría Ocular e Iluminación*. Por ello, para no repetir contenidos de aquella asignatura, nos centraremos en lo fundamental, la oposición entre luminancia y radiancia, en lugar de extendernos en consideraciones sobre los métodos de medida de la sensibilidad espectral.

Este bloque se inicia definiendo la luminosidad como el atributo perceptual por el cual un estímulo parece emitir (reflejar o transmitir) más o menos energía.

Lo esencial es que los alumnos aprendan (o recuerden) que mediante la descripción física del estímulo dada por la radiancia no se reproduce en absoluto la sensación de luminosidad, y para ello es necesario manipular la radiancia introduciendo algún elemento propio del comportamiento del sistema visual.

Esto es obvio pensando por ejemplo que una mayor radiancia no siempre implica una mayor luminosidad debido a la sensibilidad espectral de los fotodetectores retinianos. Los detectores son sensibles sólo a una región del espectro con lo que un incremento fuera de esta región no tiene ningún efecto en la luminosidad.

Se hace así evidente que es necesario incluir esta y otras propiedades del sistema visual humano para obtener un buen descriptor de la luminosidad.

En este tema se asume un modelo aditivo y lineal para la detección de la radiancia (podemos integrar el descriptor de luminosidad obtenido para cada componente espectral -ley de Abney-, y además dicho descriptor es lineal), de forma que la respuesta dependerá simplemente de la radiancia espectral pesada por la función de sensibilidad espectral: la  $V_\lambda$ .

Se hace mención rápida a la dualidad retiniana y la variación de la función de sensibilidad espectral correspondiente en función del nivel de iluminación.

Con esta suposición (ley de Abney) puede plantearse un descriptor lineal de la luminosidad: la luminancia,  $Y$ .

Para finalizar el tema se da un listado de las magnitudes y unidades radiométricas y fotométricas al que puedan acudir los alumnos que no cursaron *Fotometría*.

---

Bibliografía recomendada:

Fairchild 97 [3], Capítulo 4  
Artigas 95 [1], Capítulos 2 y 3  
Schwartz 99 [5], Capítulo 4

---

---

Bloque 2:	<i>Luminosidad</i>
TEMA 4:	LIMITACIONES DE LA LUMINANCIA COMO DESCRIPTOR DE LA LUMINOSIDAD
Tiempo aproximado:	<i>2 horas</i>

---

- 4.1 No linealidades en la percepción de la luminosidad: ley de Weber y ley de Stevens.
- 4.2 Efectos del entorno.
- 4.2.1 Entorno temporal: adaptación.
  - 4.2.2 Entorno espacial: luminosidad y claridad.
  - 4.2.3 Inducción acromática: experiencia de Heinemann.
- 

El objetivo de este tema es poner de manifiesto que el descriptor lineal presentado en el tema anterior es demasiado simple para recoger todos los aspectos de la percepción de la luminosidad.

Para ello se muestran los fenómenos básicos que muestran la insuficiencia de la luminancia: (1) los umbrales incrementales de luminancia dependen de la luminancia, y (2) la luminosidad del entorno espacio-temporal influye fuertemente en la percepción de la luminosidad de un test (hay que definir un atributo relativo: la *claridad*).

Los efectos del entorno se tratarán con más profundidad en la asignatura de *Colorimetría y Visión del Color* en el contexto del estudio de la percepción de estímulos relacionados.

Asumiendo una respuesta lineal como la presentada en el tema 3 y de acuerdo con las definiciones presentadas en el tema 2, los umbrales incrementales de luminancia deberían ser constantes en un amplio rango de luminancias (en la región útil de los detectores).

Sin embargo, las experiencias de umbrales incrementales de luminancia muestran que dichos umbrales crecen linealmente con la luminancia. Por tanto, la respuesta a la luminancia (y a la radiancia), no es lineal, sino logarítmica (ley de Weber).

Las experiencias de estimación de la luminosidad en función de la luminancia también tienen resultados no lineales: funciones exponenciales con exponente menor que la unidad (ley de Stevens).

Los alumnos tienen la oportunidad de comprobar estos efectos en la práctica 2 donde se miden fracciones de Weber (umbrales incrementales de luminancia) por el método de los límites.

Además del comportamiento no lineal de la luminosidad, el problema fundamental de la luminancia es que no incluye información del entorno del test.

En efecto, como veremos con más detalle en el tema siguiente, en condiciones normales (en las escenas naturales) los estímulos no se presentan de forma aislada, sino en un contexto más o menos complejo.

Es posible separar el efecto del entorno temporal (adaptación a un cierto nivel de luminancia) de los efectos del entorno espacial (inducción, contraste o asimilación).

La adaptación provoca una variación de la respuesta para situar la región de máxima pendiente entorno a la luminancia de adaptación, de esta forma crece la sensibilidad en esa zona. Como ejemplo se trata la variación de los umbrales de luminancia en función del tiempo de adaptación a la oscuridad.

La percepción de un estímulo luminoso en un cierto contexto espacial hace que el atributo perceptual que tiene sentido es el de *claridad*, es decir, luminosidad del test relativa a la luminosidad del entorno.

Para ilustrar este fenómeno se muestran efectos de inducción acromática y se describe la experiencia de Heinemann (que los alumnos realizarán en el laboratorio en la práctica 2), en la que la claridad queda descrita por la luminancia (variable) que hay que poner en una referencia aislada (vista sobre un fondo fijo) para igualar la claridad de un test (de luminancia fija) visto sobre un inductor con diferentes luminancias.

Los modelos que reproducen este tipo de fenómenos se dan en *Percepción Visual* y en *Colorimetría y Visión del Color*.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Capítulo 5  
Fairchild 97 [3], Capítulo 6  
Boff 86 [7], Capítulo 9

---

---

Bloque 3:	<i>Color</i>
TEMA 5:	EL COLOR COMO VECTOR: INTRODUCCIÓN A LA FENOMENOLOGÍA DE LA PERCEPCIÓN DE COLORES NO RELACIONADOS
Tiempo aproximado:	<i>3 horas</i>

---

- 5.1 Que es el color?. Estímulos cromáticos y colores.
  - 5.2 Relación entre las condiciones de observación y la complejidad de la caracterización colorimétrica.
  - 5.3 Colores no relacionados y colores relacionados.
    - 5.3.1 Condiciones de observación estándar.
    - 5.3.2 Atributos perceptuales de un color no relacionado: luminosidad,  $Q$ , tono,  $h$ , y colorido,  $M$ .
    - 5.3.3 Atributos perceptuales de un color relacionado: claridad,  $J$ , tono,  $h$ , y croma,  $C$ .
  - 5.4 Experiencias de igualación por síntesis tricromática simétrica.
    - 5.4.1 Descripción del montaje experimental: primarios,  $P_i$ , blanco de referencia,  $W$ , luminancias de igualación del color  $C$ ,  $Y_C(P_i)$ , unidades tricromáticas,  $Y_W(P_i)$ , valores triestímulo,  $T(C)$ .
    - 5.4.2 Resultados: los colores no relacionados se comportan como vectores.
- 

La pareja estímulo cromático-color, es el caso particular de estímulo-percepción del que se ocupa la colorimetría.

Como en el tema 2, *estímulo (cromático)* hace referencia a la descripción física del fenómeno que desencadena el proceso visual: es una distribución de radiación electromagnética en el plano de la retina procedente de objetos (emisores o difusores).

El *color* es un aspecto particular de la percepción visual del estímulo cromático: es el aspecto perceptual que permite diferenciar un estímulo de otros de igual área, duración, forma y textura.

Evidentemente, esta percepción (el color) depende tanto de las características del estímulo, como de los algoritmos efectuados por el cerebro sobre las respuestas de los fotodetectores. Por tanto, el color no es una propiedad intrínseca de los objetos, sino un aspecto de nuestra percepción de los mismos.

El objetivo de las teorías de la visión del color es obtener unos descriptores numéricos del color a partir del estímulo cromático. La relación entre estos

descriptores y el color debe ser biunívoca: el comportamiento de los descriptores varía cuando varía la percepción. Sin embargo, la relación entre estímulos y descriptores no será biunívoca: diferentes estímulos pueden dar lugar a los mismos descriptores (a la misma percepción).

Nuevamente como en el tema 2, la percepción (el color) queda caracterizado mediante los parámetros físicos que debemos fijar en el estímulo variable para igualar el color del estímulo de referencia.

Debido al efecto del entorno en la percepción de un test, la caracterización del color será tanto más compleja cuantas menos restricciones imponamos en el entorno, es decir, la caracterización del color (por ejemplo el número de parámetros necesario para lograr la igualación) dependerá de las condiciones que elijamos para la realización de las experiencias.

En el proceso de estudio debe establecerse un compromiso entre la generalidad de la caracterización a la que se quiera llegar y la sencillez de la misma: si se abordan experiencias de igualación muy complejas, las caracterizaciones de la percepción serán más generales, pero (con gran seguridad) los descriptores no tendrán propiedades matemáticas sencillas y será difícil operar con ellos.

Para resolver esta cuestión, en la actualidad en visión del color se trabaja con dos condiciones de observación (y experiencias de igualación) estándar, llegándose a la definición de dos tipos de percepción con descripciones diferentes: *colores no relacionados* (estímulos aislados en fondo acromático) y *colores relacionados* (estímulos formados por un test visto en un entorno donde existe una *referencia blanca* y donde el fondo puede tener diferentes características en función de la proximidad espacial al test).

En estas dos condiciones de observación se ha determinado que los colores tienen 3 y 5 dimensiones (atributos perceptuales) respectivamente:

- Para colores no relacionados: luminosidad, Q, tono, h, y colorido, M.
- Para colores relacionados: luminosidad, Q, claridad, J, tono, h, colorido, M y croma, C.

Para ilustrar el significado de las definiciones de los atributos perceptuales, se ilustran las definiciones con ejemplos generados con COLORLAB.

El objetivo de la teoría del color es calcular descriptores numéricos que reproduzcan el comportamiento experimental de estos atributos.

En *Psicofísica* nos centraremos en la caracterización de estímulos no relacionados (que da lugar a la colorimetría triestímulo clásica), dejando para *Colorimetría y Visión del Color* el estudio de la fenomenología y modelos relativos a colores relacionados (abordados por los modelos más recientes de apariencia del color que superan a la colorimetría triestímulo).

La colorimetría triestímulo se basa en experiencias de igualación simétricas mediante síntesis tricromática y estímulos no relacionados. En estas experiencias,

se demuestra que los observadores pueden igualar el color de cualquier estímulo de referencia mediante la superposición de la radiación procedente de tres fuentes (o *primarios*).

Para ello se eligen tres primarios linealmente independientes (tales que ninguno de ellos pueda obtenerse como superposición escalada de los otros),  $P_i$ , y se escalan de forma relativa para que mediante la suma de los tres se iguale un cierto *blanco de referencia*,  $W$ . Las luminancias de los primarios para igualar el blanco de referencia son las *unidades tricromáticas*,  $Y_W(P_i)$ .

Tras la igualación, el color de un estímulo de referencia queda caracterizado por una terna de *valores triestímulo*,  $T_i(C)$ , que son las luminancias utilizadas en la igualación normalizadas por las unidades tricromáticas.

Los resultados de estas experiencias indican que la caracterización triestímulo presenta estructura de espacio vectorial (leyes de Grassmann).

La superposición de estímulos (mezcla aditiva) implica la suma vectorial de las caracterizaciones triestímulo. La dirección de los vectores triestímulo del color  $C$ ,  $T(C)$ , está relacionada con la cromaticidad, y la longitud de los vectores está relacionada con la luminancia.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Capítulo 6  
Capilla 02 [4], Capítulo 1  
Artigas 02 [11], Capítulo 1  
Fairchild 97 [3], Capítulos 3 y 4  
Wyszecki 82 [12], Capítulo 3  
Boynton 92 [13], Capítulos 2 y 5  
Lozano 78 [14], Capítulo 4

---

---

Bloque 3:	<i>Color</i>
TEMA 6:	COLORIMETRÍA TRIESTÍMULO
Tiempo aproximado:	<i>5 horas</i>

---

- 6.1 Vectores triestímulo a partir del estímulo y el observador (lineal).
- 6.1.1 Estímulos en función del estímulo equienergético normalizado.
  - 6.1.2 Funciones de igualación del color,  $\bar{T}(\lambda)$ .
  - 6.1.3 Valores triestímulo,  $T(C)$ , a partir del estímulo,  $C(\lambda)$ , y las funciones de igualación,  $\bar{T}(\lambda)$ .
  - 6.1.4 Nota: radiancia reemitida por un difusor lambertiano en función de la radiancia del iluminante.
- 6.2 Primera aproximación a la descripción de los atributos perceptuales: coordenadas cromáticas y luminancia.
- 6.2.1 Separación de la descripción de la cromaticidad y la luminosidad. Diagrama cromático.
  - 6.2.2 Descripción de un color mediante coordenadas cromáticas y luminancia ( $t_1(C)$ ,  $t_2(C)$ ,  $Y(C)$ ).
  - 6.2.3 Propiedades de las mezclas en el diagrama cromático. Propiedades del locus espectral.
  - 6.2.4 Colores reales e imaginarios. Colores factibles y no factibles en una base de primarios.
- 6.3 Segunda aproximación a la descripción de los atributos perceptuales: longitud de onda dominante, pureza y luminancia.
- 6.3.1 Insuficiencia de las coordenadas para expresar el tono y el colorido.
  - 6.3.2 Longitud de onda dominante, pureza y luminancia como representación del tono, el colorido y la luminosidad ( $\lambda_d(C)$ ,  $P(C)$ ,  $Y(C)$ ).
  - 6.3.3 Colores complementarios.
- 6.4 Cambio de sistema de primarios.
- 6.4.1 Esquema general de transformaciones en colorimetría triestímulo.
  - 6.4.2 Matriz de cambio de base y transformación de  $\bar{T}(\lambda)$  y  $Y_W(P_i)$ .
  - 6.4.3 Algunos ejemplos de interés. Sistemas CIERGB y CIEXYZ.
  - 6.4.4 Constancia de los descriptores bajo cambio de representación.
-

Sabiendo que cualquier estímulo (radiancia,  $C(\lambda)$ ) puede obtenerse como superposición de las componentes monocromáticas de un estímulo equienergético,  $E(\lambda)$ , escaladas convenientemente, y conociendo las propiedades lineales de la caracterización triestímulo presentadas en el tema anterior, se ve que es posible obtener el vector  $T(C)$  de cualquier estímulo,  $C$ , a partir de su radiancia y de los vectores triestímulo de las componentes monocromáticas del estímulo equienergético.

Debido a la trascendencia de esos vectores triestímulo particulares,  $T(E(\lambda))$ , para obtener otros vectores triestímulo sin necesidad de efectuar experiencias de igualación, se les da el nombre especial de *funciones de igualación del color*,  $\bar{T}(\lambda)$ .

Estas funciones de igualación representan el comportamiento de tres (hipotéticos) mecanismos lineales que analizan el espectro de la radiación incidente dando como respuesta la terna  $T(C)$ . Debido a las propiedades empíricas de las mezclas de estímulos espectrales, es posible deducir ciertas características de  $\bar{T}(\lambda)$  independientes del sistema de primarios utilizado.

Por su importancia práctica (cuantitativa) en situaciones experimentales es importante hacer referencia en este punto a la relación geométrica existente entre la radiancia reemitida por un difusor lambertiano en función de la radiancia de la fuente que lo ilumina. Aunque esta relación es conocida por los alumnos que cursaron la asignatura optativa de *Fotometría*, es necesario recordarla (aunque sea sin demostración) para poder aplicar con éxito las ecuaciones de los valores triestímulo en situaciones donde se conocen independientemente la radiancia del iluminante y la reflectancia de los objetos iluminados.

Aunque los vectores triestímulo tienen muy buenas propiedades para operar con mezclas, no dan ninguna información sobre los atributos perceptuales de los colores ( $Q, h, M$ ). Por ello, haciendo uso del significado cualitativo de la orientación de los vectores triestímulo presentada en el tema anterior, se introduce el concepto de diagrama cromático (subespacio 2D del espacio triestímulo) y se propone la representación de la cromaticidad de un color mediante el punto de intersección de su vector triestímulo con este diagrama cromático. A estos puntos de intersección se les denomina *coordenadas cromáticas*,  $t_i(C)$ .

De esta forma, obtenemos una nueva caracterización de los colores no relacionados mediante la terna,  $(t_1(C), t_2(C), Y(C))$ , que representan la cromaticidad y la luminosidad.

Es posible demostrar que esta caracterización no es vectorial, y por lo tanto las mezclas en el diagrama cromático tienen propiedades gráficas especiales. De estas propiedades y de las propiedades empíricas de las funciones de igualación del color es posible deducir la forma convexa del locus que ocupan los colores espectrales en el diagrama cromático de cualquier sistema de primarios.

Resulta conveniente identificar en el diagrama la situación de los *colores reales* (interiores al locus), los *colores imaginarios* (exteriores); y los *colores factibles* y *no factibles* dado una cierta base de primarios (interiores o exteriores al triángulo formado por los primarios).

Analizando con ejemplos el significado de las diferentes regiones del diagrama cromático (usando COLORLAB en el aula), es evidente que hay una mejor forma de representar los atributos perceptuales de tono y colorido.

Usando el hecho de que cualquier cromaticidad puede obtenerse mediante la superposición de un estímulo espectral de una cierta  $\lambda$  y el blanco del sistema, se define la *longitud de onda dominante* de un color,  $\lambda_d(C)$ , y su *pureza de excitación* (o su *pureza colorimétrica*) a partir de la  $\lambda$  y de las proporciones de blanco y estímulo espectral necesarias. De ahí resulta evidente la relación entre la terna  $(\lambda_d, P, Y)$  y la terna de atributos  $(h, M, Q)$ . En el tema siguiente se analizará porque dicha descripción no es completamente satisfactoria.

El concepto de *colores complementarios* sirve para explicar el fenómeno experimental de la obtención de estímulos acromáticos a partir de estímulos muy saturados.

Como el sistema de primarios es un parámetro libre en las experiencias de igualación del color, es necesario un conjunto de transformaciones para relacionar las caracterizaciones presentadas hasta ahora cuando son definidas en un nuevo sistema de primarios.

Conocidos los vectores triestímulo de los nuevos primarios,  $\tilde{P}_i$ , en el sistema antiguo, puede demostrarse que el vector triestímulo de un color en el nuevo sistema,  $\tilde{T}(C)$ , está relacionado con su expresión en el sistema antiguo,  $T(C)$ , mediante una transformación lineal de cambio de base. El cambio de primarios es simplemente un cambio de base en el espacio vectorial triestímulo.

Esta transformación de los vectores triestímulo y los datos necesarios para acceder a las otras caracterizaciones,  $(t_1, t_2, Y)$  y  $(\lambda_d, P, Y)$ , evidencian que los datos necesarios para tener perfectamente caracterizado un nuevo sistema son:

- Los nuevos primarios: sus vectores triestímulo,  $T(\tilde{P}_i)$ , o equivalentemente sus cromaticidades,  $t(\tilde{P}_i)$ , más el vector triestímulo del nuevo blanco de referencia  $T(\tilde{W})$ .
- Las nuevas unidades tricromáticas:  $Y_{\tilde{W}}(\tilde{P}_i)$ .
- Las funciones de igualación del color en la nueva base:  $\tilde{\tilde{T}}(\lambda)$

Resulta interesante ver estas relaciones en un caso concreto (transformación del sistema CIERGB al sistema CIEXYZ) y ver como las caracterizaciones  $T$  y  $(t, Y)$  cambian fuertemente mientras que la variación de  $(\lambda_d, P, Y)$  es menor.

Además de las sesiones teóricas de los temas 5 y 6, los alumnos refuerzan sus conocimientos sobre colorimetría triestímulo en la práctica 3 donde se miden valores triestímulo mediante una experiencia de igualación simétrica con unos primarios ad-hoc (los de un monitor CRT) y posteriormente se transforman los valores obtenidos al espacio CIE XYZ.

## Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Capítulo 7  
Capilla 02 [4], Capítulos 1 y 2  
Wyszecki 82 [12], Capítulo 3  
Artigas 02 [11], Capítulo 1  
Malo y Luque 02 [15], Capítulos 2 y 3

---

---

Bloque 3:	<i>Color</i>
TEMA 7:	PROFUNDIZACIÓN EN LA FENOMENOLOGÍA DE LA PERCEPCIÓN DE COLORES NO RELACIONADOS
Tiempo aproximado:	5 horas

---

### 7.1 Codificación oponente del color.

- 7.1.1 Observaciones de Hering sobre la ausencia de ciertas percepciones cromáticas.
- 7.1.2 Experiencia de Jameson y Hurvich. Funciones de cancelación de tono.
- 7.1.3 Espacios triestímulo oponentes. Modelo lineal de Boynton.

### 7.2 Medida de distancias en el espacio triestímulo.

- 7.2.1 Planteamiento del problema: medida de distancias entre colores y discriminación cromática.
- 7.2.2 La métrica del espacio triestímulo no es euclídea.

### 7.3 Limitaciones de la descripción triestímulo (lineal).

- 7.3.1 Las representaciones triestímulo son insatisfactorias porque no dan lugar a espacios euclídeos.
  - 7.3.2 El tono y la luminosidad no dependen exclusivamente de los descriptores triestímulo  $\lambda_d$  e  $Y$ .
- 

Una vez presentadas las representaciones triestímulo de manera general, cabe preguntarse, cual de ellas está más próxima a la representación del color utilizada realmente por el sistema visual.

Una aproximación ingenua al problema indicaría que la representación adecuada sería aquella con funciones de igualación del color dadas por las sensibilidades espectrales de los fotodetectores de la retina.

Sin embargo existe un hecho fundamental que contradice esta idea: Hering señaló que mientras que en nuestra experiencia perceptual se producen combinaciones del tipo rojo-amarillento o verde-azulado, no se producen combinaciones del tipo rojo-verdoso ni amarillo-azulado. Esto le llevó a proponer una codificación de la cromaticidad en dos *canales oponentes* rojo-verde y azul-amarillo que diesen señal positiva o negativa ante estímulos de uno u otro tono, y señal nula ante las mezclas, de ahí que no exista esa percepción.

Esta apreciación se vió confirmada por el descubrimiento fisiológico de que parte de las células del camino visual tienen sensibilidades espectrales oponentes (positivas para una parte del espectro y negativas en el resto).

La experiencia de cancelación de tono de Jameson y Hurvich confirma psicofísicamente la existencia de dichos canales.

Como se trata en *Colorimetría*, las representaciones oponentes más avanzadas son no-lineales (y por lo tanto no triestímulo). No obstante, se han planteado algunos modelos oponentes completamente lineales basados en una etapa LMS y una posterior combinación lineal oponente de los canales LMS.

En este tema recojemos las ideas genéricas sobre medida de distancias entre estímulos expuestas en el tema 2 para aplicarlas al caso de la discriminación cromática.

A partir de los resultados experimentales de Brown-McAdam, se deduce que la métrica del espacio triestímulo no es euclídea y que se requieren transformaciones no lineales para uniformizarlo.

Para finalizar la exposición de la fenomenología de los colores no relacionados, se exponen los hechos que evidencian las limitaciones de las caracterizaciones triestímulo.

El problema de las representaciones triestímulo es que ninguna de ellas puede independizar completamente los descriptores de los atributos perceptuales. Hay dos ejemplos relacionados que confirman este hecho: (1) ninguna representación lineal puede diagonalizar todas las elipses de discriminación cromática (aunque los espacios oponentes consiguen una primera aproximación razonable), y (2) los efectos Abney-Aubert, Bezold-Brücke y Helmholtz-Kohlrausch evidencian que la luminosidad y el tono no dependen exclusivamente de  $Y$  y  $\lambda_d$ . En concreto el *efecto Abney-Aubert* indica que los locus de tono constante no son rectas de  $\lambda_d$  constante en ningún diagrama cromático; el *efecto Bezold-Brücke* indica que dichas curvas de tono constante además dependen de la luminancia; y el *efecto Helmholtz-Kohlrausch* indica que la luminosidad crece con el colorido.

Estos fenómenos (métrica y efectos) se han relacionado obteniendo las curvas de tono constante (de Abney y Bezold) a partir de las geodésicas entre el blanco y un color espectral.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Capítulo 9  
Capilla 02 [4], Capítulo 4  
Fairchild 97 [3], Capítulo 6  
Wyszecki 82 [12], Capítulo 5  
Boynton 92 [13], Capítulos 7 y 8  
Wandell 95 [2], Capítulo 9

---

---

Bloque 4:	<i>Textura</i>
TEMA 8:	TEXTURAS Y PATRONES PERIÓDICOS
Tiempo aproximado:	<i>7 horas</i>

---

### 8.1 ¿A que llamamos textura?.

- 8.1.1 Textura y patrones periódicos. Ejemplos.
- 8.1.2 Utilidades de la percepción de textura.

### 8.2 Elementos del análisis de Fourier 2D.

- 8.2.1 Representación de una función en una base de funciones. Transformada de Fourier.
- 8.2.2 Espectro de una imagen. Módulo y fase. Energía y contraste de las componentes frecuenciales de una imagen.
- 8.2.3 Significado intuitivo de las componentes del dominio de Fourier: escalas y orientaciones.
- 8.2.4 Listado de propiedades de la transformada 2D.

### 8.3 El dominio de Fourier es apropiado para representar texturas. Ejemplos de texturas en el dominio de Fourier: escala, orientación y fase.

### 8.4 El dominio de Fourier es apropiado para representar la respuesta de ciertos sistemas.

- 8.4.1 Actuación de un sistema lineal (homogéneo): convolución.
- 8.4.2 Representación del sistema en el dominio de Fourier: Función filtro.

### 8.5 Ejemplos de respuesta ante ciertas texturas en función del filtro.

### 8.6 Transformada de Fourier 3D.

- 8.6.1 Secuencias y movimiento.
- 8.6.2 Redes espacio-temporales.
- 8.6.3 Objetos en movimiento en el dominio de Fourier.

---

Como en los casos anteriores, este bloque se inicia con una aproximación intuitiva al concepto considerado: en este caso la textura.

Partiendo de ejemplos, llegamos a la conclusión de que el aspecto fundamental de la textura es la presencia de unas ciertas relaciones espaciales repetidas periódicamente en una región. La escala y la orientación son propiedades esenciales de la textura.

También mediante ejemplos se hace hincapié en la importancia de la discriminación de texturas como paso previo para la percepción de formas.

Partiendo de estas ideas básicas (periodicidad, escala y orientación), a continuación se introduce el análisis de Fourier como un método apropiado de representar las propiedades básicas de la textura.

En este tema tan sólo se presenta el lenguaje matemático necesario para formular la respuesta del sistema visual a diferentes texturas (temas 9-11 de esta asignatura). En esta asignatura se evitan las demostraciones en la exposición de los conceptos, limitándonos a enunciarlos e ilustrarlos mediante ejemplos gráficos que permitan una comprensión intuitiva del significado del dominio de Fourier.

Es en la asignatura troncal *Percepción Visual* donde se realiza un estudio más detallado de estos conceptos y se pretende que los estudiantes adquieran una comprensión más profunda mediante el manejo computacional de estas herramientas.

La exposición se inicia mediante la presentación de la transformada de Fourier como una representación de una imagen (función) alternativa a su representación espacial. Se define la energía de una función en el dominio espacial y en el de Fourier. Se analiza el significado de los parámetros de las sinusoides: amplitud (energía), frecuencia y fase.

Hecho esto, se muestran ejemplos de transformadas de imágenes simples para ilustrar el significado de las diferentes regiones del dominio de Fourier.

El objetivo de la presentación de las propiedades de la transformada de Fourier es sistematizar las propiedades que se han visto intuitivamente en los ejemplos de espectros.

Una vez listadas las propiedades de la transformada, se muestran ejemplos de espectros de texturas más complejas para mostrar lo apropiado de esta representación para la caracterización de texturas.

A continuación se presenta la descripción del comportamiento de un sistema lineal en el dominio de frecuencias. En primer lugar se describe el comportamiento del sistema en el dominio espacial haciendo uso de los conocimientos de los alumnos del modelo lineal de respuesta de las células del camino visual que conocen por la troncal *Neurofisiología*.

Enunciada la relación de convolución (asumiendo la invariancia espacial), se introduce la representación del sistema mediante la función filtro en lugar de la respuesta impulsional o campo receptivo.

Después de esto, se presentan ejemplos para adquirir intuición sobre el efecto de determinados filtros en imágenes naturales: pasa-baja, pasa-alta, pasa-banda y filtros direccionales.

Los ejemplos en este tema se harán explícitamente en el aula con MATLAB que los alumnos vean que a pesar de lo complejo del formalismo, las herramientas

numéricas permiten ver los comportamientos de forma sencilla. De esta forma se les va preparando para que manejen estas herramientas en las prácticas de *Percepción Visual* (y también en las de *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico*).

Para finalizar el tema, se generalizan los resultados del análisis de Fourier a 3 dimensiones, incluyendo la variable tiempo.

Creo que es preferible hacer esta generalización aquí en lugar de en los temas de movimiento (temas 12 y 13) para reforzar la idea de que en realidad se trata del mismo tipo de análisis, y así presentar la CSF espacio-temporal en el mismo contexto que las otras.

En este caso, no se revisan las propiedades de la transformada exhaustivamente ya que son más difíciles de visualizar. Tan sólo nos limitamos a enunciar el teorema de Fourier para secuencias de imágenes, y ver que las redes espacio-temporales son redes en movimiento con velocidad dada por la relación entre la frecuencia espacial y la temporal.

En cualquier caso, estos conceptos se revisarán con más detalle en la asignatura de *Percepción Visual*.

---

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulos 2 y 7, Apéndice A  
Schwartz 99 [5], Capítulo 7  
Escalera 01 [16], Capítulo 4  
Pratt 91 [17], Capítulos 7 y 8  
Gonzalez 87 [18], Capítulo 3  
Thompson y Shure 93 [19], Capítulo 1

---

Bloque 4:	<i>Textura</i>
TEMA 9:	RESPUESTA FRECUENCIAL DEL SISTEMA VISUAL
Tiempo aproximado:	<i>3 horas</i>

---

## 9.1 Medida experimental de las funciones filtro.

- 9.1.1 Modelo lineal de procesado de la información espacio-temporal.
- 9.1.2 Medida psicofísica de la función filtro mediante la determinación de umbrales de detección de redes.
- 9.1.3 Redes acromáticas y cromáticas. Contraste cromático y acromático.
- 9.1.4 Redes temporales.
- 9.1.5 Redes espacio-temporales.

## 9.2 Respuesta empírica a redes.

- 9.2.1 Función de sensibilidad al contraste acromático.
  - 9.2.2 Funciones de sensibilidad al contraste cromático R-G e Y-B.
  - 9.2.3 Funciones de sensibilidad al parpadeo (CSFs temporales acromática y cromáticas).
  - 9.2.4 Superficies de sensibilidad espacio-temporal acromática y cromáticas.
  - 9.2.5 Factores que afectan a las CSFs.
- 

El objetivo de este tema es presentar la idea básica para la determinación experimental de las funciones filtro (determinación de umbrales de detección de redes) así como los resultados básicos de estos experimentos.

En primer lugar, en conexión con lo dicho en el tema anterior, se vuelve a hacer hincapié en que la actuación de un sistema caracterizado por un filtro consiste en atenuar de forma selectiva las diferentes componentes frecuenciales del estímulo. Por lo tanto, es posible caracterizar cada punto de la función de transferencia hallando la atenuación sufrida por una red.

Como este dato no es accesible psicofísicamente, se asume que el umbral en las respuestas (o equivalentemente el ruido en las respuestas) es independiente de la frecuencia, de forma que la pendiente de la respuesta a cada frecuencia (el valor del filtro) puede obtenerse a partir del umbral de detección de contraste de la red correspondiente.

Dicho esto, se presentan ejemplos de las posibles redes que podemos considerar: redes espaciales, temporales y espacio-temporales, acromáticas y cromáticas en cada caso.

Una vez presentados los estímulos que deben usarse en los experimentos, se presentan los resultados de los mismos: las funciones de sensibilidad al contraste espacial, temporal y espacio-temporal, acromáticas y cromáticas.

Lo importante a destacar en estos casos es la forma general de las curvas, la posición del máximo de sensibilidad y las frecuencias de corte (o anchura de las bandas de paso).

Para finalizar, revisaremos brevemente los factores que influyen en las CSFs: básicamente luminancia media, excentricidad y MTF de los medios ópticos. Sin entrar en los detalles físicos (que se tratan en la asignatura de *Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico*), aquí se hace referencia a los conocimientos superficiales que tienen los alumnos sobre la MTF (adquiridos en *Óptica Fisiológica*) y se incide en la similitud formal de la descripción de los sistemas óptico y neuronal. El resultado obvio es que si se modifica la MTF, la función de transferencia global (la CSF) se verá afectada en consecuencia.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Capítulo 13  
Wandell 95 [2], Capítulo 7  
Schwartz 99 [5], Capítulo 7  
DeValois 90 [20], Capítulo 5

---

---

Bloque 4:	<i>Textura</i>
TEMA 10:	DETECTORES DE FRECUENCIA Y ORIENTACIÓN
Tiempo aproximado:	<i>3 horas</i>

---

#### 10.1 Existencia de canales selectivos a frecuencia y orientación.

- 10.1.1 Necesidad de la existencia de detectores de banda estrecha.
- 10.1.2 Evidencias fisiológicas: campos receptivos de las células del córtex.
- 10.1.3 Evidencias psicofísicas: experiencias de enmascaramiento.
- 10.1.4 Resultados: batería de detectores selectivos a la posición espacial, frecuencia y orientación.

#### 10.2 No-linealidades en la respuesta a contrastes.

- 10.2.1 Umbrales incrementales de contraste.
  - 10.2.2 Consecuencia: respuestas no lineales.
- 

Las funciones globales de sensibilidad a frecuencias espacio-temporales presentadas en el tema anterior tan sólo explican las limitaciones en la percepción de ciertas texturas por quedar fuera de la banda de paso del sistema.

Sin embargo, nuestra habilidad para discriminar texturas de diferente escala y orientación en diferentes posiciones espaciales implica que deben existir detectores más selectivos.

Una codificación de la imagen según las respuestas de un sistema de detectores de banda estrecha daría lugar a respuestas muy diferentes en función de la composición espectral de la textura. Existen diferentes evidencias que confirman esta hipótesis.

Por un lado, la fisiología nos dice que los campos receptivos de las células del V1 son funciones de Gabor (localizadas en espacio, frecuencia y orientación).

Por otro lado, también es posible medir la anchura de banda de estos detectores de forma psicofísica mediante experiencias de enmascaramiento. Efectivamente, asumiendo la existencia de estos detectores, si se estimulan con el patrón adecuado se producirá una saturación de la respuesta que implicará una reducción en la sensibilidad del mecanismo.

Si en esta situación de saturación (o enmascaramiento) se hacen medidas de la sensibilidad frecuencial del sistema, ésta estará reducida en la región entorno a la que sea sensible el detector. De esta forma, de la caída local en la CSF puede deducirse la extensión frecuencial del mecanismo que ha sido enmascarado.

Los resultados de estas medidas fisiológicas y psicofísicas revela la existencia de un sistema de detectores que recubren el dominio frecuencial descomponiéndolo en (aproximadamente) 4 escalas y 4 orientaciones, con anchuras frecuenciales de una octava (que crecen con la frecuencia central de sintonizado). Este tipo de resultados también se tienen en el caso espacio-temporal.

Por tanto, las texturas presentes en una imagen (o secuencia) quedan representadas por las respuestas de este sistema de detectores. Como veremos en el tema 14, los umbrales (o el ruido) en ese espacio de respuestas determinan nuestra capacidad para discriminar texturas.

Se aborda ahora la cuestión de si la respuesta de estos mecanismos es o no lineal. Como vimos en el tema 2 dicha cuestión se resuelve viendo si los umbrales incrementales son constantes en el rango de contrastes.

Los resultados de Legge y Watson revelan que esto no es así: el tamaño de los umbrales crece con el contraste (de forma análoga a lo que ocurre con la luminancia -ley de Weber-), luego la respuesta es no lineal, disminuyendo la pendiente conforme crece el contraste.

---

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulos 5, 7 y 8  
Spillmann 90 [6], Capítulo 10  
DeValois 90 [20], Capítulo 6

---

Bloque 4: *Textura*

TEMA 11: VISION DE ESTÍMULOS PUNTUALES Y BREVES

Tiempo aproximado: *2 horas*

---

#### 11.1 Visión de estímulos puntuales.

11.1.1 Sumación espacial: ley de Ricco.

11.1.2 Agudeza visual: tareas de discriminación de estímulos próximos.

11.1.3 Factores que influyen en la agudeza visual.

#### 11.2 Visión de estímulos breves.

11.2.1 Sumación temporal: ley de Bloch.

11.2.2 Frecuencia crítica de fusión.

11.2.3 Efectos Broca-Sulzer, Brücke-Bartley y Talbot-Plateau.

---

Este tema sirve de ilustración de los efectos de la respuesta frecuencial (espacial y temporal) en la discriminación de estímulos puntuales y breves. De esta forma relacionamos el poder de resolución espacial (agudeza) o el poder de resolución temporal (frecuencia crítica de fusión) con las frecuencias de corte de las respuestas frecuenciales correspondientes o con las anchuras de las respuestas impulsionales.

Además tratamos el tema de la sumación espacial y temporal para este tipo de estímulos. En este sentido, la ley de Ricco o la ley de Bloch sobre la reducción del umbral de detección con el incremento de la superficie o la duración del test respectivamente, se reducen a un fenómeno de incremento de la respuesta en los detectores debido a la integración (espacial o temporal) del estímulo.

Estos comportamientos revelan que mientras los estímulos son pequeños o breves la detección se rige por la energía total emitida por el estímulo. De esta forma, si crece la superficie o el tiempo, crece la energía con la consiguiente reducción del umbral.

A partir de un cierto límite, superado en condiciones de visión natural, el comportamiento se rige por la potencia (energía por unidad de tiempo y unidad de superficie), en lugar de regirse por la energía.

Finalmente incluimos el efecto Broca-Sulzer (y el efecto asociado Brücke-Bartley) como resultados no explicables mediante el comportamiento lineal descrito por la respuesta frecuencial. El resultado asintótico (de Talbot-Plateau) vuelve a ser explicable mediante la curva de respuesta frecuencial temporal.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Capítulos 12, 18 y 19

---

Bloque 5: *Movimiento*

TEMA 12: ESTÍMULOS EN MOVIMIENTO: FLUJO ÓPTICO

Tiempo aproximado: *2 horas*

---

12.1 Niveles de abstracción en visión de movimientos.

12.2 Flujo óptico.

12.2.1 Definición.

12.2.2 Utilidad de la información de flujo óptico: segmentación y tiempo de impacto.

12.3 Ecuaciones del flujo óptico.

12.3.1 Ecuación del flujo óptico en el dominio espacial.

12.3.2 Ecuación del flujo óptico en el dominio frecuencial.

---

Este bloque se inicia con una reflexión sobre los posibles niveles de abstracción (visión de alto o bajo nivel) que podemos considerar en la percepción de movimiento.

Por un lado (a alto nivel), podemos considerar la percepción de movimiento que se tiene *tras analizar la escena*, una vez que hemos segmentado e interpretado los objetos que la integran. Este tipo de percepción está relacionada con la estimación de los parámetros dinámicos (velocidad y aceleración) de los objetos en el espacio 3D, y permite la predicción de trayectorias con un grado de precisión notable. Este tipo de predicciones depende fuertemente de un conocimiento a priori del comportamiento de los objetos rígidos que se desplazan de acuerdo con la mecánica newtoniana. Con este conocimiento es posible extraer correspondencias entre conjuntos de puntos de un sólido en diferentes instantes y deducir sus parámetros dinámicos.

Por otro lado (a bajo nivel), podemos considerar la percepción del movimiento que ocurre *con independencia del análisis de la escena*, previa al establecimiento de correspondencias entre puntos o características detectadas en distintos instantes de tiempo. En este caso, nos referimos sólo a la detección de desplazamientos 2D en el plano de fotodetección. Dicha percepción sólo depende de las variaciones espacio-temporales de la iluminación retiniana.

A pesar de su interés, la percepción de alto nivel queda completamente fuera de los objetivos del presente curso debido a que no existe una teoría clara sobre como el cerebro almacena o aplica la información a priori necesaria para resolver estos problemas. Aquí nos restringiremos al problema de bajo nivel puesto que (como se ve en este tema y más en detalle en la asignatura *Percepción Visual*)

la detección de los desplazamientos 2D (el flujo óptico) puede relacionarse fácilmente con los detectores sintonizados a ciertas frecuencias espacio-temporales presentados en el tema 10.

El objeto de este tema es doble. Por una parte, hacer reflexionar al alumno una vez más sobre las limitaciones de las aproximaciones de bajo nivel, y por otra, una vez elegido el problema a estudiar, formularlo con precisión.

Para ello, en primer lugar, recordando la definición que se dió en el tema 8 de objetos en movimiento, definimos el *flujo óptico* como el campo de vectores desplazamiento que relaciona las distribuciones de radiancia en el plano de fotodetección en dos instantes de tiempo.

Se resalta el hecho de que, a pesar de las limitaciones de la información de bajo nivel, el conocimiento del flujo óptico puede resultar muy útil para contribuir a la segmentación de objetos o como complemento a la información binocular para la estimación de profundidades.

Por último, se obtienen las ecuaciones del flujo óptico en los dominios espacial y frecuencial. La ecuación en el dominio espacial pone de manifiesto *el problema de la apertura* que impide la correcta estimación del flujo óptico en ausencia de textura suficiente en la escena.

Estas son las ecuaciones en las que deberán basarse los modelos (objeto de la asignatura *Percepción Visual*) para obtener el flujo óptico.

---

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulo 10 y Apéndice E  
Artigas 95 [1], Capítulo 20

---

---

Bloque 5:	<i>Movimiento</i>
TEMA 13:	INTRODUCCIÓN A LA FENOMENOLOGÍA DE LA PERCEPCIÓN DE MOVIMIENTO
Tiempo aproximado:	<i>2 horas</i>

---

### 13.1 Experimentos con puntos aleatorios.

13.1.1 La percepción de movimiento (de bajo nivel) puede ser previa al análisis de formas.

13.1.2 Umbrales absolutos de movimiento: Alcance de las correspondencias entre puntos.

13.1.3 Integración de la sensación de movimiento.

### 13.2 Experimentos con redes sinusoidales.

13.2.1 Percepción de redes aisladas. Problema de la apertura.

13.2.2 Percepción de sumas de redes. Intersección de las velocidades.

### 13.3 Adaptación y post-efectos de movimiento.

---

De la extensa literatura sobre efectos visuales relacionados con el movimiento, en este capítulo tan sólo incluiremos resultados de experiencias con puntos aleatorios y redes periódicas, que son los estímulos más utilizados en la actualidad para testear los modelos de percepción de movimiento a bajo nivel.

Por un lado, las secuencias de puntos aleatorios constituyen un buen estímulo para el estudio del movimiento por tres motivos: (1) son estímulos de movimiento puro porque dos fotogramas de una secuencia de puntos aleatorios tienen exactamente la misma apariencia, es decir, no contienen características significativas (bordes, variación de textura) que puedan usarse para establecer correspondencias en diferentes instantes, (2) debido a su espectro espacial plano, un movimiento coherente da un plano bien definido en el dominio de frecuencias, y (3) resulta muy sencillo experimentalmente generar cualquier tipo de distribución de flujo óptico.

Por otro lado, las redes en movimiento también son estímulos muy apropiados porque son los estímulos más elementales posibles en el dominio frecuencial y por lo tanto pueden controlarse para aislar la respuesta de detectores de banda estrecha en este dominio.

En primer lugar mostramos algunos resultados obtenidos mediante experiencias de puntos aleatorios.

Para resaltar que existe percepción de movimiento previa al análisis de forma se muestra el experimento de Braddick donde el movimiento coherente de un conjunto de puntos es la única clave para segmentarlos como un objeto independiente del fondo.

A continuación se repasan los resultados clásicos sobre umbrales de velocidad mínima y máxima para tener sensación de movimiento, y se presenta su variación con la excentricidad. En la asignatura de *Percepción Visual* veremos que los datos sobre los desplazamientos máximos son relevantes para estimar la extensión espacial de las unidades de detección de movimiento en el modelo de Reichardt. Estos datos revelan una interacción de corto alcance, frente a los mecanismos involucrados en el efecto  $\phi$  que requiere correlaciones de mayor alcance.

Respecto de las velocidades mínimas tan sólo es interesante destacar que los resultados pueden no referirse a umbrales de los mecanismos de movimiento sino también a los que median la agudeza Vernier.

Además de los umbrales absolutos, son interesantes las experiencias que exploran los factores que dan lugar a la percepción de un movimiento global como por ejemplo, porcentajes de puntos que se mueven de forma coherente (con las velocidades pertenecientes a un rango de módulos y orientaciones). Los alumnos trabajan con este tipo de estímulos en la práctica 5 determinando grados de coherencia mínimos para percibir movimiento.

Aunque tras el tema 8 los alumnos ya cuentan con los elementos básicos sobre transformadas de Fourier que les permitirían interpretar los resultados de estos experimentos, es preferible abordar su análisis más estricto en la asignatura de *Percepción Visual* cuando se expliquen los modelos de visión de movimiento y los alumnos hayan tenido la oportunidad de ver en el laboratorio las transformadas de este tipo de secuencias.

Las redes sinusoidales ilustran muy bien la ambigüedad de la apertura y la desaparición de dicha ambigüedad cuando varias redes se superponen de forma que sólo existe una única velocidad compatible para todas ellas.

Se muestra que la velocidad del patrón que resulta al sumar sinusoides no es la suma vectorial de las velocidades de las sinusoides. Y además, se ve que si no existe una única velocidad compatible, se tienen varias sensaciones de movimiento simultáneas.

La descripción de estos efectos se ilustra en el aula mediante ejemplos generados en MATLAB.

Para finalizar el tema se muestran post-efectos de movimiento (el llamado *efecto cascada*) resultantes de la adaptación de los mecanismos de detección cuando han sido expuestos de forma prolongada a un estímulo con movimiento constante.

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulo 10  
Schwartz 99 [5], Capítulo 9  
Spillmann 90 [6], Capítulo 9  
Artigas 95 [1], Capítulo 20

---

---

Bloque 6: *Integración a alto nivel*

TEMA 14: MEDIDAS DE DISTORSIÓN

Tiempo aproximado: *2 horas*

---

14.1 La percepción de distorsión es un problema de integración.

14.1.1 Descripción del problema.

14.1.2 Utilidades científicas y tecnológicas de las medidas de distorsión.

14.2 Cuantificación experimental de la distorsión.

14.2.1 Estimación de la magnitud.

14.2.2 Distorsión medida en unidades significativas: mínimas diferencias perceptibles.

---

En los bloques anteriores hemos revisado las dimensiones básicas de la percepción a bajo nivel. A este nivel, un estímulo está descrito por las respuestas del conjunto de mecanismos sensibles a esas dimensiones.

En este tema no nos separamos mucho del bajo nivel, pero presentamos un ejemplo de una primera integración de dichas respuestas: el problema de la percepción de una distorsión superpuesta a un estímulo complejo.

La percepción de distorsión proviene de una comparación de las diferentes respuestas obtenidas en cada dimensión y una determinada sumación de esas diferencias.

Como pusimos de manifiesto en general en el tema 2, dicho problema es geométrico, es decir supone calcular distancias entre estímulos descritos en el espacio de representación. En el caso particular de una imagen natural en color, tenemos una representación con dimensiones espaciales, frecuenciales y cromáticas, y para evaluar la distorsión, habrá que integrar las diferencias sobre todas estas dimensiones.

El estudio de las habilidades de discriminación en imágenes complejas tiene interés tanto científico como tecnológico. Desde el punto de vista científico es conveniente para generalizar los resultados obtenidos estudiando de forma aislada cada mecanismo y entender como interaccionan todas las dimensiones de la representación. Desde el punto de vista tecnológico, la evaluación de distorsiones es importante en aplicaciones donde se pretende transmitir imágenes con la máxima fidelidad (minimizando la distorsión) o donde se pretende resaltar detalles de interés (maximizando la diferencia).

Experimentalmente resulta inabordable la medida exhaustiva de los umbrales de discriminación ya que la altísima dimensionalidad del problema impide

la realización de experiencias variando el estímulo en todas las direcciones del espacio de representación.

Por eso, habitualmente se realizan experiencias de estimación de la magnitud en función de la amplitud física de la distorsión. El problema con este tipo de medidas es que proporcionan resultados que dependen fuertemente del contexto (patrón original) y del tipo de distorsión, y por lo tanto no son comparables entre sí.

Para solucionar el problema de la compatibilidad de resultados al tratar con contextos o distorsiones diferentes es presentar los resultados en términos de mínimas diferencias perceptibles. Para medir cual es la distorsión en estos términos se han planteado métodos para determinar las curvas de respuesta a la distorsión de la misma forma que se miden umbrales incrementales en experiencias con estímulos simples.

---

Bibliografía recomendada:

Watson 93 [21], Parte III  
Spillmann 90 [6], Capítulo 10  
Boff 86 [7], Capítulo 7

---

---

Bloque 6:	<i>Integración a alto nivel</i>
TEMA 15:	SEGMENTACIÓN Y GESTALT
Tiempo aproximado:	<i>1 hora</i>

---

15.1 El problema de la segmentación y la interpretación de las imágenes.

15.2 Reglas de segmentación.

15.2.1 Segmentación basada en descripciones de bajo nivel.

15.2.2 Principios de segmentación de la escuela Gestalt.

---

Una vez analizadas las características básicas de la descripción de los estímulos visuales a bajo nivel, en este tema, el último de la asignatura, se hace un repaso rápido de ciertos efectos que muestran la complejidad de la realización de tareas elementales a partir de las primitivas de bajo nivel.

El problema de la identificación de objetos a partir de descripciones a bajo nivel consiste en la agrupación perceptual de ciertas regiones espaciales debido a su proximidad en el espacio de respuestas de los detectores de textura, color y movimiento.

Si bien es posible realizar segmentaciones figura-fondo sencillas considerando las distancias entre diferentes regiones en el espacio de representación, no es trivial explicar como en función de estas primitivas se llega a la percepción de agrupaciones en escenas complejas.

En este tema revisamos algunos de los principios empíricos que rigen estas percepciones, enunciados originalmente por la psicología Gestalt. Entre ellos se encuentran los factores de proximidad, la constancia del tamaño, la continuidad de los contornos, la inercia (continuidad del movimiento), percepción de profundidad a partir de gradientes de textura, percepción de profundidad a partir de la iluminación.

Así mismo se presentan ejemplos de ilusiones inducidas por la interpretación que se haga de una cierta región, como por ejemplo el incremento de luminosidad o la apariencia de proximidad al interpretar una región como figura respecto de un fondo.

Estos ejemplos ponen de manifiesto que en nuestra percepción utiliza en gran medida un conocimiento a priori del comportamiento de nuestro entorno (fotometría lambertiana, movimiento de los objetos rígidos, continuidad de los objetos, relaciones de oclusión), que son intrínsecamente de alto nivel, es decir, no se obtienen del análisis de las percepciones de bajo nivel analizadas durante el curso.

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulo 11  
Artigas 95 [1], Capítulo 16

---

### 5.1.4 Desarrollo de los contenidos (laboratorio)

---

PRÁCTICA 1: MÉTODOS PSICOFÍSICOS DE IGUALACIÓN

Tiempo aproximado: 3 horas

---

#### Objetivo

El objetivo de esta primera práctica es introducir al alumno en el uso de los métodos experimentales básicos para la realización de igualaciones y la estimación de umbrales perceptuales:

- Método de los límites.
- Método de los ajustes.
- Método de estímulos constantes.

#### Descripción

En este caso, para presentar las técnicas de igualación y umbrales se utiliza el problema de la estimación de luminosidades mediante igualación.

Se presenta a los observadores unos tests cromáticos cuya luminosidad deben estimar igualándola con la de un test auxiliar de luminancia variable.

Los observadores utilizan los tres métodos citados para la realización de la igualación y la determinación de la luminancia que caracteriza a la luminosidad correspondiente.

#### Material

- Sonda de luminancia.
- Ordenador con MATLAB para la generación de los estímulos.

#### Conexión con los temas de teoría

Además del objetivo instrumental de presentar al alumno las técnicas elementales que irá utilizando en las siguientes sesiones, esta práctica ilustra ciertos contenidos presentados en los temas 1 y 2: la caracterización de una magnitud perceptual mediante los parámetros físicos fijados en una igualación, y la existencia del ruido asociado a las medidas psicofísicas.



---

PRÁCTICA 3:                   COLORIMETRÍA TRIESTÍMULO

Tiempo aproximado:    3 horas

---

### **Objetivo**

El objetivo es que los alumnos comprueben las propiedades vectoriales de la caracterización triestímulo.

### **Descripción**

Para ello los alumnos eligen un sistema de primarios arbitrario, y usan esta base en experimentos de igualación tricromática para medir valores triestímulo de un conjunto de estímulos.

Escalando la luminancia de los estímulos a caracterizar, superponiéndolos y volviendo a determinar los valores triestímulo se comprueban las leyes de Grassmann.

Además, midiendo la base y los estímulos con un colorímetro se puede comprobar la relación de cambio de base y la consistencia de las medidas realizadas.

### **Material**

- Sondass de luminancia y cromaticidad.
- Ordenador con MATLAB y COLORLAB para la selección y generación de los estímulos.

### **Conexión con los temas de teoría**

Los experimentos ilustran los contenidos presentados en el tema 5 y los cálculos para comprobar la relación con las medidas del colorímetro sirven para fijar los contenidos sobre cambio de base presentados en el tema 6.

## PRÁCTICA 4: FUNCIONES DE SENSIBILIDAD AL CONTRASTE

Tiempo aproximado: 3 horas

---

**Objetivo**

El objetivo es la obtención de las funciones de respuesta frecuencial para el canal acromático y los cromáticos.

**Descripción**

Para ello los alumnos determinan el umbral de detección del contraste de redes sinusoidales acromáticas y cromáticas de frecuencias 0.5, 1, 2, 4, 8 y 16 ciclos/grado.

La medida del umbral se realiza por el método de escalera con elección forzosa entre dos presentaciones. Las oscilaciones (precalculadas y almacenadas en el ordenador) se realizan respecto de un blanco de  $20 \text{ cd/m}^2$  en las direcciones A, T y D del modelo oponente lineal de Boynton.

De forma opcional, los alumnos más rápidos pueden repetir la medida de una CSF utilizando diferentes desenfoques ópticos.

**Material**

- Ordenador con MATLAB y COLORLAB para el cálculo de los estímulos, presentación de los estímulos y recojida de los datos.
- Cinta métrica para controlar el tamaño del estímulo y la distancia de observación.
- (Opcionalmente) caja de lentes de prueba para inducir ametropías esféricas.

**Conexión con los temas de teoría**

Los experimentos ilustran los contenidos presentados en el tema 9 sobre percepción de redes sinusoidales.

Los datos obtenidos también pueden ser útiles para su uso en la práctica 3 de asignatura de *Percepción Visual*, para que simulen la percepción de imágenes complejas utilizando un filtro con sus propios datos.

---

PRÁCTICA 5:                    UMBRAL DE COHERENCIA EN EL MOVIMIENTO

Tiempo aproximado:    *3 horas*

---

### **Objetivo**

Determinación del umbral de coherencia necesario para percibir un movimiento coherente en secuencias de puntos aleatorios.

### **Descripción**

En una secuencia de puntos aleatorios moviéndose en direcciones aleatorias no se percibe un movimiento coherente hasta que un cierto porcentaje de los puntos no se mueve de la misma forma.

Utilizando secuencias precalculadas con grados de coherencia crecientes, los alumnos utilizan el método de los estímulos constantes para la determinación del umbral de coherencia.

### **Material**

- Ordenador con MATLAB para la generación y presentación de los estímulos, y para el análisis de los resultados.

### **Conexión con los temas de teoría**

Los experimentos ilustran el concepto de flujo óptico presentados en el tema 12 y los resultados sobre puntos aleatorios presentados en el tema 13. El análisis de las secuencias ilustra las ideas presentadas en el tema 8 sobre la transformada de Fourier de secuencias en movimiento.

El análisis de las transformadas que puede iniciarse en este curso, adquiere pleno sentido para los estudiantes cuando cursan la asignatura de *Percepción* y ven los modelos frecuenciales de cálculo de flujo óptico (tema 10) y adquieren más soltura en la interpretación del espectro de las señales (práctica 2).

## 5.2 Colorimetría y Visión del Color

### 5.2.1 Cuadro Sinóptico

COLORIMETRÍA Y VISIÓN DEL COLOR
<p>CARÁCTER: Optativo  CRÉDITOS: 3 teóricos + 3 prácticos  UBICACIÓN: Cuarto semestre (segundo semestre del segundo curso)  MATERIA BOE: Colorimetría y Visión del Color.  DESCRIPTORES BOE: Espacios de representación del color. Discriminación cromática. Espacios uniformes. Modelos de apariencia del color. Sistemas de ordenación del color. Medida y reproducción del color. Aplicaciones.</p>
OBJETIVOS
<p>El objetivo es doble: (1) presentar al alumno la fenomenología de la percepción del color no cubierta en <i>Psicofísica</i> y ejemplos de modelos no-lineales que son casos particulares del paradigma de adaptación/inducción/constancia que se tratará en <i>Percepción</i>; y (2) reforzar los conocimientos del alumno en fotometría y colorimetría triestímulo, dándole las herramientas para controlar el funcionamiento de dispositivos de generación de estímulos en la experimentación psicofísica.</p>
TEMARIO
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sesiones teóricas (30 horas) <ul style="list-style-type: none"> <li>– Caracterización Numérica del Color (4 temas, 14 horas)</li> <li>– Tecnología del Color (4 temas, 16 horas)</li> </ul> </li> <li>• Sesiones prácticas (30 horas, 3 horas/sesión) <ul style="list-style-type: none"> <li>– Práctica 1: Instrumental de medida del color (3 horas)</li> <li>– Práctica 2: Reproducción del color en monitores (3 horas)</li> <li>– Práctica 3: Introducción a COLORLAB (6 horas)</li> <li>– Práctica 4: Efecto del iluminante en diferentes espacios de representación del color (6 horas)</li> <li>– Práctica 5: Uniformidad perceptual de distintos espacios de representación del color (3 horas)</li> <li>– Práctica 6: Solución de problemas con COLORLAB (9 horas)</li> </ul> </li> </ul>
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA
Fairchild 97 [3]    Capilla 02 [4]    Wandell 95 [2] Artigas 02 [11]    Malo y Luque 02 [15]    Artigas 95 [1]

EVALUACIÓN
<p>La nota se basa en un examen de cuestiones sobre los contenidos impartidos en las sesiones teóricas (50%), y en la evaluación de la capacidad de los alumnos para aplicar dichos conocimientos en problemas colorimétricos (50%).</p> <p>La competencia en la aplicación de la teoría se evalúa mediante una memoria en la que se expone la solución a uno de los problemas planteados para ser resueltos con COLORLAB en las sesiones prácticas.</p> <p>Con independencia de la ponderación citada, es necesario superar la parte teórica para aprobar la asignatura.</p>
INTERACCIONES CON ASIGNATURAS PREVIAS (Ver Fig. 2.1)
<p><b>Psicofísica de la Visión</b> (troncal, tercer semestre): En <i>Psicofísica</i> se presenta la teoría triestímulo y la teoría de la codificación oponente del color que son requisito previo para el estudio de modelos de apariencia del color y las aplicaciones tecnológicas tratadas en <i>Colorimetría</i>.</p> <p><b>Matemáticas</b> (troncal, primer y segundo semestres): Además de conseguir que el alumno adquiriera una cierta destreza en el uso del lenguaje matemático (necesaria, por ejemplo, para la comprensión los espacios triestímulo y los cambios de representaciones cromáticas), las sesiones de prácticas de <i>Matemáticas</i> ofrecen una introducción a MATLAB que resulta crucial a la hora de poder explotar eficazmente las potencialidades de una herramienta como COLORLAB.</p> <p><b>Fotometría Ocular</b> (optativa, segundo semestre): Aunque puede seguirse la <i>Colorimetría</i> sin cursar la <i>Fotometría</i>, esta asignatura resulta conveniente porque, además del concepto de luminancia (también cubierto en <i>Psicofísica</i>), se analizan los factores geométricos que intervienen en los problemas de iluminación y que resultan claves en situaciones prácticas.</p>
INTERACCIONES CON ASIGNATURAS POSTERIORES (ver Fig. 2.1)
<p><b>Percepción Visual</b> (troncal, quinto semestre): (1) refuerza el concepto de representación de estímulos en un espacio, la medida de distancias entre ellos y pone de manifiesto la insuficiencia de los modelos lineales, y (2) consolida el uso de MATLAB como herramienta para explorar el comportamiento de modelos matemáticos.</p> <p><b>Optometría III</b> (troncal, quinto semestre) y <b>Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico</b> (optativa, sexto semestre): En estas asignaturas se utilizan diversos test cromáticos para la detección de anomalías visuales. La utilidad de la <i>Colorimetría</i> es doble, por un lado refuerza el contexto teórico de dichos tests (presentado superficialmente en <i>Psicofísica</i>) y, por otro lado, proporciona al alumno las herramientas técnicas para la generación de los estímulos cromáticos que sean necesarios en la experimentación.</p> <p><b>Aplicaciones Clínicas del Tratamiento de Imágenes</b> (optativa, sexto semestre): El trabajo con color en sistemas informáticos a nivel teórico y práctico permite el trabajo con imágenes en color en <i>Aplicaciones Clínicas</i>.</p>

### 5.2.2 Descripción de los bloques temáticos

La asignatura optativa *Colorimetría y Visión del Color* sirve de complemento a las asignaturas troncales *Psicofísica de la Visión y Percepción Visual*.

Su objetivo es doble: por un lado presentar al alumno la fenomenología de la percepción del color no cubierta en *Psicofísica* y ejemplos de modelos no-lineales de que son casos particulares del paradigma de adaptación/inducción/constancia que se quiere introducir en *Percepción*; mientras que por otro lado, se trata de reforzar los conocimientos del alumno en radiometría y colorimetría triestímulo dándole las herramientas para controlar/entender el funcionamiento de dispositivos de generación de estímulos, que pueden ser de utilidad para la experimentación psicofísica.

La asignatura se organiza en dos partes: 30 sesiones de teoría (30 horas), y 10 sesiones de laboratorio (30 horas). Las sesiones de teoría se estructuran en 2 bloques temáticos de cuatro temas cada uno:

- Bloque 1: Caracterización numérica del color
  - Tema 1: Colores no relacionados. Repaso de la colorimetría triestímulo.
  - Tema 2: Colores relacionados. Fenomenología.
  - Tema 3: Colores relacionados. Modelos de apariencia.
  - Tema 4: Validación de un modelo de visión del color.
- Bloque 2: Tecnología del color
  - Tema 5: Sistemas de comunicación visual.
  - Tema 6: Medida del color.
  - Tema 7: Procesado del color.
  - Tema 8: Reproducción del color.

El primero de los bloques está dedicado a profundizar en la caracterización del color iniciada en *Psicofísica de la Visión*. En particular, se pone el énfasis en las limitaciones de la colorimetría triestímulo y se describe la fenomenología asociada a la visión de los estímulos cromáticos en interacción espacio-temporal con otros (adaptación, inducción y constancia del color). Como consecuencia de esta fenomenología se evidencia la necesidad de los elementos básicos de los modelos de visión del color, estudiándose en detalle algunos de ellos.

En el segundo bloque de temas se tratan los problemas de medida, procesado y reproducción que surgen en los sistemas de administración del color.

#### Bloque 1: Caracterización numérica del color

En el primer tema de este bloque, '*Colores No Relacionados, Repaso de la Colorimetría Triestímulo*', se revisan brevemente los conceptos presentados en la unidad 3 de *Psicofísica* para fijar el formalismo triestímulo antes de abordar descripciones del color más avanzadas.

En el segundo tema del bloque, '*Colores Relacionados I, Fenomenología*', se presentan ejemplos de los efectos básicos de la percepción del entorno espacio-temporal en la percepción de un test, básicamente *inducción, adaptación y constancia del color*. Se hace hincapié en que nos limitaremos a explicaciones basadas en el cambio de las respuestas de los detectores, no considerando aspectos cognitivos.

En el tema siguiente, '*Colores Relacionados II, Modelos*' se presentan los objetivos que debe abordar un modelo de apariencia del color y los elementos básicos de dichos modelos: algoritmos de adaptación o inducción, respuestas no lineales, codificación opone y especificaciones para el cálculo de distancias y descriptores perceptuales. Así mismo se analizan en detalle el CIELab y el modelo ATD de Guth y como utilizar computacionalmente otros modelos de apariencia.

En el último tema del bloque, '*Validación de Modelos de Apariencia del Color*', se describe el conjunto de propiedades que debe cumplir un buen modelo de apariencia del color. No se trata de obtener un ranking de los modelos, puesto que ninguno supera claramente a los demás, sino poner de manifiesto el comportamiento ideal e interpretar como cada modelo se desvía de dicho comportamiento de diferentes formas.

## **Bloque 2: Tecnología del color**

El primer tema de este segundo bloque, '*Sistemas de Administración del Color*', es una charla introductoria para describir el tipo de problemas técnicos que se encuentran en el trabajo con dispositivos de comunicación visual y alguna terminología utilizada en este ámbito. Los siguientes temas del bloque tratan cada uno de estos problemas.

El segundo tema del bloque, '*Medida del Color*', se tratan los métodos prácticos de medida precisa del color que no involucran observadores, básicamente *espectroradiómetros, espectrofotómetros, y colorímetros de filtros*.

En el tercer tema de este bloque, '*Procesado del Color*', se abordan los problemas que surgen en el tratamiento del color en TV y sistemas informáticos. Se describe aquí la cuantización del color se aplica en los sistemas informáticos, la selección del espacio de representación cromática para la transmisión de imágenes en color, y el problema de compatibilización de gamas de colores.

En el último tema del bloque, '*Reproducción del Color*', tratamos los métodos sustractivos y aditivos de reproducción del color y analizamos en detalle un dispositivo que ejemplifica cada uno de dichos métodos: la fotografía en color y los monitores de ordenador.

## **Sesiones de Laboratorio**

El objetivo de las sesiones de laboratorio es doble: por un lado trabajar con aparatos de medida y reproducción del color, y por otro poner en manos de los alumnos una herramienta de software, COLORLAB, para trabajar con el color. El uso de COLORLAB les permite por un lado mejorar la comprensión de la

teoría mediante la experimentación directa, y por otro lado resolver problemas colorimétricos realistas (complejos) de forma sencilla. La idea es que la experimentación iniciada en el laboratorio pueda ser continuada por el alumno cuando se dedique al estudio de la materia.

- Practica 1: Instrumentos de medida del color (3 horas).
- Practica 2: Reproducción del color en monitores (3 horas).
- Practica 3: Introducción a COLORLAB (6 horas).
- Practica 4: Efecto del espectro y la luminancia en diferentes espacios de representación (6 horas).
- Practica 5: Uniformidad perceptual de diferentes espacios de representación (3 horas).
- Practica 6: Solución de problemas colorimétricos con COLORLAB (9 horas).

En primer lugar se realizan las prácticas que tienen un carácter instrumental (prácticas 1 y 2) para recojer datos con los que se trabajará después y entender el funcionamiento del dispositivo de reproducción del color que se utilizará en el resto de sesiones.

Mientras que las prácticas 3-5 son prácticas *guiadas* en las que se presenta la herramienta que utilizaremos o se estudian fenómenos concretos, la práctica 6, de mayor duración, es una práctica *abierto* donde los estudiantes deben utilizar los conocimientos y herramientas a su alcance para resolver problemas complejos sin guión (sólo con la orientación del profesor).

### 5.2.3 Desarrollo de los contenidos (teoría)

---

Bloque 1:	<i>Caracterización Numérica del Color</i>
TEMA 1:	COLORES NO RELACIONADOS. REPASO DE LA COLORIMETRÍA TRIESTÍMULO
Tiempo aproximado:	3 horas

---

- 1.1 Colores relacionados y colores no relacionados. Descriptores perceptuales.
  - 1.2 Repaso de los conceptos de la colorimetría triestímulo:
    - 1.2.1 Experiencias de igualación tricromática. Luminancia. Primarios. Unidades tricromáticas. Vectores triestímulo.
    - 1.2.2 Espacio triestímulo.
    - 1.2.3 Coordenadas cromáticas y luminancia. Diagrama cromático.
    - 1.2.4 Longitud de onda dominante, pureza y luminancia.
    - 1.2.5 Cambio de sistema de referencia.
  - 1.3 Los espacios triestímulo no son euclídeos.
  - 1.4 Limitaciones de la colorimetría triestímulo.
- 

Debido a la importancia de la teoría triestímulo como base para el trabajo en colorimetría avanzada es conveniente un repaso de lo expuesto en la unidad 3 de *Psicofísica* (temas 5-7).

Nuestra experiencia indica que aunque los alumnos conocen la fenomenología básica tras cursar la *Psicofísica*, necesitan refrescar las relaciones matemáticas.

Por eso, en este tema se recuerda la definición de las caracterizaciones triestímulo,  $T(C)$ ,  $(t_1(C), t_2(C), Y(C))$  y  $(\lambda_d(C), P(C), Y(C))$ , sus relaciones con el estímulo,  $C(\lambda)$ , y el modelo lineal del observador  $\bar{T}(\lambda)$ , y las transformaciones entre ellas.

Además, se hace hincapié en los datos que es necesario conocer para tener completamente definido de un sistema de primarios,  $T(P_i)$ ,  $Y_W(P_i)$  y  $\bar{T}(\lambda)$ , de forma que sean accesibles todas las caracterizaciones citadas arriba.

Por último, se recuerda brevemente el carácter oponente de la codificación del color en el sistema visual, el carácter no euclídeo de los espacios triestímulo, y la insuficiencia de los descriptores perceptuales triestímulo aun en el caso de colores no relacionados (efectos Abney-Aubert, Bezold-Brücke y Helmholtz-Kohlrauch).

En lugar de plantear el tema como la mera exposición de un formulario, se hace uso de COLORLAB en el aula tras haber facilitado a los alumnos la

documentación del programa. De este modo los estudiantes pueden comprobar que el uso del ordenador permite una exploración sencilla del comportamiento de las representaciones triestímulo que sería imposible sin herramientas numéricas.

Mediante esta metodología los estudiantes cuentan con ejemplos de trabajo con los que empezar a utilizar COLORLAB antes de que empiecen las sesiones prácticas y lo que es más importante les permiten fijar el conocimiento superficial que tenían de la teoría triestímulo.

---

Bibliografía recomendada:

Capilla 02 [4], Capítulos 1, 2 y 4  
Artigas 95 [1], Capítulos 6 y 7  
Wyszecki y Stiles 82 [12], Capítulos 3 y 5  
Malo y Luque 02 [15], Capítulos 2 y 3  
Artigas 02 [11], Capítulo 1

---

---

Bloque 1:	<i>Caracterización Numérica del Color</i>
TEMA 2:	COLORES RELACIONADOS I: FENOMENOLOGÍA
Tiempo aproximado:	<i>3 horas</i>

---

### 2.1 Efectos espaciales (inducción).

2.1.1 Contraste simultáneo y asimilación.

2.1.2 *Crispening*.

2.1.3 Mezclas aparentes.

### 2.2 Efectos temporales (adaptación)

2.2.1 Adaptación a la luz y a la oscuridad.

Efecto Hunt. Efecto Stevens. Efecto Bartleson-Brenemann.

2.2.2 Adaptación cromática. Post imágenes

### 2.3 Efectos combinados.

2.3.1 Igualaciones asimétricas y pares correspondientes.

2.3.2 Constancia del color.

### 2.4 Explicaciones sensoriales frente a explicaciones cognitivas.

---

En este tema se presentan, mediante ejemplos desarrollados con COLORLAB, los efectos básicos del entorno espacio-temporal en la percepción de un test:

- Efectos del entorno espacial (genéricamente *inducción*):

*Contraste simultáneo*, que implica que la percepción del test se aleja de la del estímulo inductor.

*Asimilación*, que implica que la percepción del test se acerca a la del estímulo inductor.

*Crispening*, que implica que las diferencias percibidas entre dos estímulos se acentúan si dichos estímulos se presentan sobre un fondo similar a ellos.

*Mezclas aparentes*, que ocurren en configuraciones espaciales de alta frecuencia.

- Efectos del entorno temporal (genéricamente *adaptación*):

*Adaptación acromática*, que implica que la curva (no lineal) de respuesta a la energía varía con el tiempo al producirse una transición de oscuridad a luz o viceversa. Esta variación de la respuesta tiende a situar la zona de

máxima pendiente (de máxima sensibilidad) en la región dada por la nueva situación (alta iluminación o baja iluminación). Por ello los umbrales de detección y discriminación varían.

Otros efectos de la variación de luminancia: *efecto Hunt*, equivalente del *efecto Helmholtz-Kohlrauch* para colores relacionados. Efectos de incremento del contraste de luminosidad y claridad al incrementar la luminancia, *efecto Stevens* y *efecto Bartleson-Brenemann*.

*Adaptación cromática*, que implica la compensación de la cromaticidad del estímulo adaptador en la percepción de los estímulos que se presentan tras él, dando lugar a postimágenes (sobre fondos acromáticos o sobre estímulos complejos).

- Efectos combinados (genéricamente *constancia del color*):

*Pares correspondientes*. Aquí se trata el tema de las igualaciones asimétricas de tests percibidos en diferentes condiciones (espacio-temporales) de observación, y se estudian los resultados experimentales de Brenemann.

*Descuento del iluminante*. Se presentan ejemplos en los que, bien debido a inducción o a adaptación, los observadores consiguen identificar objetos (reflectancias) a pesar de cambios dramáticos en los valores de estímulo.

Para finalizar el tema se aborda la cuestión de que en el fenómeno de la constancia de la percepción a pesar del cambio en los estímulos intervienen factores sensoriales (de bajo nivel), y factores cognitivos (de alto nivel, que tienen lugar tras el análisis y comprensión semántica de la escena).

Esta reflexión define el abanico de explicaciones que serán de interés en este curso: debido a que los factores cognitivos han sido escasamente formalizados (cuantitativamente), nos centraremos en el estudio de modelos sensoriales que intentan reproducir esta fenomenología.

---

Bibliografía recomendada:

Fairchild 97 [3], Capítulos 6 y 8  
 Capilla 02 [4], Capítulo 3  
 Wandell 95 [2], Capítulo 9  
 Boynton 92 [13], Capítulos 2 y 6

---

---

Bloque 1:	<i>Caracterización Numérica del Color</i>
TEMA 3:	COLORES RELACIONADOS II: MODELOS
Tiempo aproximado:	<i>5 horas</i>

---

### 3.1 Objetivos de los modelos de apariencia del color.

- 3.1.1 Representación del color: descorrelación de los descriptores perceptuales.
- 3.1.2 Uniformización del espacio de representación.
- 3.1.3 Reproducción de la constancia del color: inducción, adaptación, pares correspondientes y pares correspondientes.

### 3.2 Elementos básicos de los modelos de apariencia

- 3.2.1 Inducción y adaptación cromática. Modelo de Von-Kries y teoría retinex.
- 3.2.2 Respuesta no lineal.
- 3.2.3 Canales oponentes.
- 3.2.4 Cálculo de descriptores perceptuales.
- 3.2.5 Especificaciones para el cálculo de distancias.

### 3.3 Estudio detallado de dos modelos de apariencia.

- 3.3.1 Un modelo *ad-hoc*: CIE  $L^*a^*b^*$ .
- 3.3.2 Un modelo fisiológico: el modelo ATD de Guth.

### 3.4 Otros modelos de apariencia del color.

CIE CAM, L LAB, CIE  $L^*u^*v^*$ , SVF.

---

Un modelo de apariencia del color debe conseguir tres objetivos básicos: (1) Proponer unos *descriptores descorrelacionados* de los atributos perceptuales, es decir, que cada atributo dependa solamente de un descriptor. En una representación con esta propiedad, los locus de claridad, tono o croma constante serían simples planos perpendiculares, en lugar de subespacios sin expresión analítica (no existirían efectos tales como el Abney-Aubert, Bezold-Brücke, Helmholtz-Kohlrausch o Hunt). Además, los elipsoides de discriminación cromática expresados en dicho espacio deberían estar orientados según los ejes de la representación puesto que si los diferentes atributos son independientes, la detectabilidad de una distorsión no debe depender de si se varía el color en una o más dimensiones simultáneamente. (2) Conseguir una *representación euclídea*, como sería

deseable en un dominio con atributos (dimensiones) independientes y con igual relevancia perceptual. (3) Reproducir los fenómenos de constancia del color (pares correspondientes y descuento del iluminante) utilizando la información del entorno espacio-temporal.

Para conseguir estos objetivos, los modelos simulan el comportamiento del sistema visual humano: se utilizan representaciones oponentes (canal acromático y canales R-G e Y-B), se aplican no linealidades a los valores triestímulo para simular la saturación de las respuestas, y se normaliza la respuesta obtenida en cada punto de la escena por una función de su entorno espacio-temporal para simular los efectos de la adaptación cromática (reducción de la sensibilidad) y el contraste simultáneo.

El modelo de normalización por el entorno (modelo de Von-Kries o modelo retinex) es especialmente interesante porque, además de su utilidad tanto en adaptación como en inducción, tiene similitudes formales con los modelos que se usan para explicar las no linealidades de los mecanismos de percepción de contraste.

Los modelos de apariencia del color deben especificar como se calculan los descriptores de los atributos perceptuales a partir de la representación que resulta de aplicar las transformaciones de adaptación cromática y las no linealidades. En líneas generales, los descriptores de la luminosidad y la claridad están relacionados con funciones no lineales de la respuesta del canal acromático. Por otro lado, la oponencia da lugar a representaciones polares de la cromaticidad: los descriptores de croma están relacionados con el módulo del vector de canales oponentes y los descriptores de tono están relacionados con el ángulo de dicho vector.

Además, por último, deben proporcionar una expresión para el cálculo de diferencias de color, ya sea en el dominio de descriptores perceptuales o en el inmediatamente anterior.

A continuación analizaremos en detalle dos modelos concretos tratando de identificar en ellos los elementos descritos con anterioridad.

En primer lugar, estudiaremos el espacio CIE  $L^*a^*b^*$  debido a que por su sencillez y su comportamiento razonablemente bueno resulta un modelo de referencia en el desarrollo de nuevas propuestas. Parte de los problemas de CIE  $L^*a^*b^*$  provienen de las limitaciones de la transformación de adaptación cromática y de que no puede incluirse información sobre el entorno (tan sólo sobre una referencia blanca). Veremos como se han superado en cierta medida estos problemas mediante una modificación sencilla: el RLAB.

En segundo lugar, estudiaremos el espacio ATD de Guth como ejemplo de los modelos basados en la simulación de las etapas fisiológicas conocidas.

Para acabar el tema se presenta un listado de otros modelos recogidos en el libro de Fairchild e implementados en COLORLAB. En estos casos, tan sólo se presenta el contexto para el que fueron diseñados y se explica al alumno cuales

son los parámetros de entrada y salida del modelo para que pueda experimentar con las funciones de COLORLAB si lo desea.

---

Bibliografía recomendada:

Fairchild 97 [3], Capítulos 9 - 14

Capilla 02 [4], Capítulo 3

Malo y Luque 02 [15], Capítulos 2 y 3

---

Bloque 1: *Caracterización Numérica del Color*

TEMA 4: VALIDACIÓN DE MODELOS DE APARIENCIA DEL COLOR

Tiempo aproximado: *3 horas*

---

4.1 Descorrelación y uniformización del espacio de representación. (Datos de McAdam)

4.2 Reproducción de pares correspondientes. (Datos de Breneman)

4.3 Reproducción de escalas de magnitud. (Datos LUTCHI)

4.4 Representación uniforme de sistemas de ordenación del color

4.4.1 Sistemas de ordenación del color y su utilidad para la verificación de modelos de apariencia del color.

4.4.2 Sistema Munsell.

4.4.3 Natural Color System.

4.5 Revisión gráfica del funcionamiento de los modelos.

---

En este tema se presentan los métodos para contrastar la validez de un cierto modelo de apariencia del color y se aplican dichos métodos sobre los modelos estudiados en el tema anterior. Dado que ningún modelo es el definitivo, lo importante no es obtener un *ranking* de los modelos estudiados, sino que los alumnos aprendan cual sería el comportamiento deseable e interpreten como los diferentes modelos se desvían de este comportamiento de distintas formas.

Mediante los datos de los elipsoides de discriminación cromática de Brown-McAdam podemos evaluar la capacidad de uniformización de la representación alcanzada con los diferentes modelos, así como el grado de descorsrelación entre las dimensiones del espacio.

Para ello hemos de atender al tamaño de los elipsoides en los diferentes puntos del espacio y su alineamiento con los ejes.

Los datos de pares correspondientes de Breneman permiten evaluar cual es el modelo que mejor reproduce los resultados de igualaciones asimétricas (adaptación e inducción cromática). En este caso se trata de reproducir los desplazamientos cromáticos obtenidos en este tipo de experiencias.

Lo relevante en este caso es que los alumnos entiendan como se calculan los pares correspondientes con un modelo invirtiendo la percepción cambiando las condiciones de observación (la especificación de las referencias y el entorno).

La base de datos LUTCHI (*Loughborough University of Technology Computer Human Interface*) recoge resultados de experimentos de estimación de la magnitud de parámetros perceptuales en función de los descriptores triestímulo en diferentes condiciones de observación (para diferentes referencias blancas, fondos y medios de reproducción). Estos datos, que incluyen escalas de claridad, tono y colorido, pueden usarse para comprobar la bondad de las predicciones de los modelos.

A continuación se presentan dos sistemas uniformes de ordenación del color (el *Atlas Munsell* y el *Natural Color System*) cuyas muestras deberían quedar uniformemente distribuidas en una representación dada por un buen modelo de apariencia.

Finalmente, para concluir el tema, en la línea seguida en el capítulo 15 del libro de Fairchild [3], mostramos ejemplos más prácticos (de interés en sistemas de reproducción de imágenes).

Aquí, utilizando los distintos modelos, se hallan las imágenes correspondientes a ciertas imágenes naturales presentadas en diferentes condiciones de observación. Con esta simulación pueden verse las diferencias de los distintos modelos en casos prácticos (de interés tecnológico en lugar de interés académico).

---

Bibliografía recomendada:

Fairchild 97 [3], Capítulo 15  
Malo y Luque 02 [15], Capítulos 2 y 3

---

Bloque 2: *Tecnología del color*

TEMA 5: SISTEMAS DE ADMINISTRACIÓN DEL COLOR

Tiempo aproximado: *1 hora*

---

- 5.1 Sistemas de administración del color. Definición y ejemplos.
  - 5.2 Esquema general: medida procesado y reproducción del color.
  - 5.3 Caracterizaciones del color ligadas al dispositivo e independientes del dispositivo.
  - 5.4 Problemática básica: calibrado en la medida y reproducción, y selección de la representación cromática adecuada para el procesado del color.
- 

Un sistema de administración del color (o sistema de comunicación visual) es un sistema cuyo objetivo es reproducir la sensación visual dada por una escena física en ausencia de la misma.

Habitualmente se llama de esta forma a los sistemas integrados de captura y reproducción de imágenes (fotografía, TV, cámara digital-ordenador-monitor/impresora, etc.), pero podremos extender el concepto a otro tipo de sistemas en los que los problemas colorimétricos son equivalentes (iluminación, artes gráficas, diseño de colorantes, etc.).

El esquema general de estos sistemas incluye una etapa de medida del color de la escena física, una etapa de procesado del color medido (para modificar el color, tomar decisiones en función del color o adecuarlo al medio de reproducción del color), y una etapa de reproducción del color.

Se dan ejemplos concretos de diferentes esquemas de procesado en aplicaciones tales como modificación del color en aplicaciones de transmisión o almacenamiento de imágenes, o en sistemas de control de calidad.

Se introduce así mismo, el concepto de caracterizaciones del color dependientes e independientes del dispositivo, (obviamente) de escaso interés en ciencia del color, pero de uso generalizado en el ámbito de la ingeniería de este tipo de sistemas.

Finalmente, se revisa cual es la problemática colorimétrica que aparece en el diseño de este tipo de sistemas: el calibrado de los procesos de medida y reproducción (es decir, el establecimiento de relaciones entre las caracterizaciones dependientes e independientes del dispositivo), y la selección de la representación cromática adecuada para efectuar un determinado procesado (como por

ejemplo la reducción de información en una imagen o la adaptación de gamas de colores entre dispositivos no compatibles).

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 02 [11], Capítulo 2

---

Bloque 2: *Tecnología del color*

TEMA 6: MEDIDA DEL COLOR

Tiempo aproximado: *3 horas*

---

### 6.1 Introducción: métodos de medida del color.

6.1.1 Determinación de la radiancia espectral.

6.1.2 Cálculo de los valores triestímulo mediante sensores con sensibilidades espectrales adecuadas.

### 6.2 Medida de radiancias espectrales: espectroradiómetros.

6.2.1 Estructura de un espectroradiómetro.

6.2.2 Calibración.

6.2.3 Precauciones en la medida.

### 6.3 Medida de reflectancias: espectrofotómetros.

6.3.1 Estructura de un espectrofotómetro.

6.3.2 Calibración.

6.3.3 Simplificaciones posibles.

### 6.4 Colorímetros de filtros triestímulo.

6.4.1 Funcionamiento básico.

6.4.2 El problema de la selección de los filtros.

---

En este tema se tratan los métodos prácticos de medida del color: los que no involucran la realización de experimentos de igualación, ni la participación de observadores.

Estos métodos hacen uso de la relación (presentada originalmente en el tema 6 de *Psicofísica*) entre los valores triestímulo y la radiancia espectral que proviene del estímulo.

Existen dos opciones: (1) medir radiancias, reflectancias o transmitancias espectrales y aplicar después la relación usando funciones de igualación del color estándar, y (2) obtener los valores triestímulo de forma directa mediante detectores lineales con una sensibilidad espectral proporcional a las funciones de igualación del color en algún sistema de referencia.

Expuestas estas posibilidades, se analiza el funcionamiento general de los aparatos de medida basados en cada uno de estos principios: el *espectroradiómetro*, el *espectrofotómetro* y el *colorímetro de filtros*.

Los alumnos complementan los conocimientos adquiridos en este tema con el uso de este instrumental en la práctica 1 de esta asignatura.

Las *cámaras en color* no se tratan en detalle en este tema porque, a pesar de ser instrumentos de medida del color, no están diseñadas explícitamente para dar lecturas en valores triestímulo y no son tan precisas como los instrumentos citados. Las cámaras basadas en CCDs se dan como un ejemplo de colorímetro de filtros triestímulo de precisión limitada. Las cámaras basadas en película fotográfica se analizan posteriormente (en el tema 8) en el contexto de la reproducción del color por métodos aditivos y sustractivos.

En los comentarios sobre espectroradiómetros se hace hincapié en su estructura general: fuente de referencia de espectro absoluto conocido, monocromador, y necesidad de un detector lineal para simplificar el calibrado del sistema.

Además se resalta la necesidad de ser cuidadoso en el muestreo del espectro (en la selectividad del monocromador) en el caso de la medida de fuentes fluorescentes o lámparas de descarga de espectro discreto.

Las particularidades de la medida de reflectancias complica la estructura de los espectrofotómetros frente a los espectroradiómetros: en el caso más general (si se trata de medir muestras fosforescentes y/o fluorescentes y no lambertianas) es necesario tener dos monocromadores, controlar el tiempo de exposición y el tiempo en el que se mide la radiación, así como la geometría de incidencia y reemisión.

Se obtienen las expresiones para la reflectancia problema tanto en el caso de tener el detector (lineal) calibrado como en el caso de conocer el espectro del iluminante.

Por último, se comentan las simplificaciones posibles en el esquema general al tratar con muestras no fluorescentes, no fosforescentes, lambertianas o esquemas de medida en los que se ilumine la muestra de forma difusa.

En el caso de los colorímetros de filtros se destaca el problema de la construcción de detectores con sensibilidades proporcionales a las funciones de igualación del color (o equivalentemente, transmitancias de filtros proporcionales a las funciones de igualación).

Debido a su complejidad matemática, no se trata el tema de la corrección de los valores triestímulo estimados cuando los filtros no cumplen las condiciones requeridas.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 95 [1], Apéndice 3  
Capilla 02 [4], Capítulo 6

---

Bloque 2: *Tecnología del color*

TEMA 7: PROCESADO DEL COLOR

Tiempo aproximado: *6 horas*

---

7.1 Generalidades: procesado del color en TV y en sistemas informáticos.

7.2 Discretización del color en sistemas informáticos.

7.2.1 Imágenes digitales. Muestreo y cuantización.

7.2.2 El problema de la cuantización fina.

7.2.3 El problema de la cuantización severa: selección de la paleta de color.

7.3 Selección del espacio de representación cromática para la transmisión de imágenes en color.

7.3.1 Información y anchura de banda. Eliminación de información en las imágenes en color.

7.3.2 Objetivo: jerarquización perceptual de las dimensiones cromáticas.

7.3.3 Aspectos perceptuales que influyen en la selección del espacio: CSFs cromáticas y acromática y propiedades de discriminación cromática.

7.3.4 Conclusión: espacios de representación cromática para transmisión (o compresión) en PAL, NTSC y JPEG.

7.4 Compatibilización de gamas de colores.

---

Las imágenes de televisión se transmiten por canales de capacidad limitada, y los sistemas informáticos tienen precisión (resolución) y memoria limitadas, lo cual implica ciertas peculiaridades en la codificación del color en estos sistemas.

Específicamente, en ambos casos debe seleccionarse un espacio de representación adecuado que permita reducir drásticamente la anchura de banda espacial de las componentes cromáticas de las imágenes, y en el caso de los sistemas informáticos, además la codificación del color debe ser discreta y utilizar un número limitado de colores.

Una vez planteados estos problemas, se describe brevemente lo que es una imagen digital, distinguiendo el proceso de muestreo espacial y el de cuantización de las muestras cromáticas. Las imágenes pueden representarse como *tres matrices triestímulo* o como una matriz de índices que hace referencia a una *paleta de color*.

Las limitaciones en la resolución de los valores triestímulo (cuantización fina) implica la limitación (débil) del máximo número de colores que puede representar un sistema informático, con los consiguientes errores asociados (que serán pequeños).

Las limitaciones fuertes (errores grandes) se deben a la limitación del tamaño de la paleta de color (cuantización severa). En este caso resulta trascendente el espacio de representación cromática que se utiliza para seleccionar un pequeño número de colores para representar al gran número de colores potencialmente presente en una imagen natural. Aquí se analizan mediante ejemplos los resultados de minimizar el error promedio en espacios no euclídeos frente al uso de espacios uniformes.

El problema de la selección de la representación cromática para la transmisión o almacenamiento de imágenes en color constituye un ejemplo excelente del impacto de las ciencias de la visión en la tecnología de la imagen y la estrecha conexión entre ambas. Además, este problema resulta interesante porque en su solución no sólo intervienen aspectos relacionados con la percepción del color, sino que también influye el comportamiento espacial de los canales cromáticos estudiado previamente en *Psicofísica* y posteriormente en *Percepción Visual*.

En primer lugar se analiza cualitativamente, mediante ejemplos, la relación entre información contenida en una imagen y su anchura de banda frecuencial. Como conclusión se obtiene que para eliminar información en situaciones críticas (canales de baja capacidad o limitaciones de tamaño para almacenar) es necesario reducir la banda de forma que se introduce una distorsión en la imagen.

Después, se introduce la idea de que en el caso de imágenes en color, es deseable tener jerarquizadas las componentes cromáticas para introducir más distorsión en los canales menos relevantes perceptualmente.

Teniendo esto en cuenta, se repasan en primer lugar, las propiedades espaciales del canal acromático y los canales cromáticos oponentes (presentadas en *Psicofísica*) que establecen que el canal acromático procesa más información que los canales cromáticos. A continuación se recuerdan las propiedades de discriminación cromática haciendo hincapié en el diferente efecto perceptual de los desplazamientos cromáticos en diferentes direcciones del diagrama.

Dicho esto, se presentan los espacios de representación cromática utilizados en los estándares de TV PAL y NTSC, y el estándar de compresión JPEG, así como las anchuras de banda recomendadas en estos casos. Mediante el cálculo de la posición de los primarios en el diagrama cromático se ve que las distorsiones en los canales cromáticos R-G e Y-B se producen respectivamente en las direcciones cortas y largas de las elipses de McAdam, entendiéndose la diferente anchura de banda recomendada para los dos canales cromáticos (mayor para R-G y menor para Y-B).

Finalmente se presentan ejemplos del resultado de aplicar estas reducciones de banda en este espacio en comparación con resultados equivalentes en sistemas de primarios reales RGB.

Para finalizar el tema, se consideran varias aproximaciones al problema de la compatibilización de gamas de colores en dispositivos incompatibles. Con estos ejemplos se pretende poner de manifiesto la importancia de trabajar en una representación de descriptores perceptuales.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 02 [11], Capítulo 4  
Hunt 95 [22], Capítulos 19 y 22  
Malo y Luque 02 [15], Capítulos 2 y 3

---

---

Bloque 2:	<i>Tecnología del color</i>
TEMA 8:	REPRODUCCIÓN DEL COLOR
Tiempo aproximado:	<i>6 horas</i>

---

### 8.1 Reproducción aditiva y sustractiva.

- 8.1.1 Generalidades: suma de espectros frente a producto de transmitancias.
- 8.1.2 Ejemplo: generación de un color amarillo.
- 8.1.3 Colores absorbidos y transmitidos por los filtros.
- 8.1.4 Particularidades de los primarios sustractivos.

### 8.2 Fotografía en color.

- 8.2.1 Fotografía en blanco y negro. Curva H-D. Negativo y positivo.
- 8.2.2 Codificación del color en el negativo: colores complementarios.
- 8.2.3 Obtención del color real en el positivo.

### 8.3 Reproducción del color en monitores.

- 8.3.1 Generación de un color controlando la luminancia de N primarios.
- 8.3.2 Funcionamiento elemental de un monitor.
- 8.3.3 Relación voltaje-luminancia. Gamma del monitor.
- 8.3.4 Calibración colorimétrica de un monitor.
- 8.3.5 Colores reproducibles en el monitor de un ordenador.

---

El tema se inicia poniendo de relieve la diferencia que existe entre la generación de un color mediante un *método aditivo*, superposición de radiaciones o suma de espectros, y un *método sustractivo*, la superposición de filtros frente a una fuente o difusor blanco, o producto de transmitancias.

Se considera explícitamente el ejemplo de la generación de un estímulo amarillo para que los alumnos vean que, mientras que en el caso aditivo, *rojo + verde = amarillo*, en el caso sustractivo *rojo + verde = negro*.

Estas reflexiones y el análisis de los colores obtenidos al superponer filtros de banda estrecha y de banda ancha, justifican la necesidad de utilizar filtros de banda ancha, Cyan Magenta y Amarillo (CMY), en la generación sustractiva de color.

El resto del tema se dedica a ver en detalle un ejemplo de cada uno de estos métodos de reproducción del color: *fotografía en color* (método sustractivo) y *monitores* (método aditivo).

La primera parte del apartado dedicado a la fotografía en color revisa brevemente los elementos básicos del proceso fotográfico: el *negativo* y el *positivo* (estudiados por parte de los alumnos en la asignatura optativa *Fotografía y Técnicas de la Imagen*).

A continuación se describe el proceso de codificación del color en el negativo mediante sustratos que absorben R, G y B (y, por tanto, transmiten C, M e Y). De esta forma se ve que los colores de la escena quedan representados en el negativo mediante sus complementarios (aproximados).

Finalmente se ve que si en el positivo se utilizan los mismos filtros de absorción R, G y B que en el negativo, y se ilumina con luz blanca filtrada por el negativo, se oscurecen los sustratos de tal forma que la transmitancia final deja pasar la banda que provenía de la imagen original.

En la primera parte del apartado dedicado a la reproducción aditiva se deduce la ecuación del color que se obtiene mediante la superposición de la radiación que proviene de N primarios que poseen una cierta luminancia. Controlando las luminancias de estos primarios podemos modificar el color.

A continuación se describe de forma elemental el funcionamiento de un monitor: la luminancia de los primarios (fósforos) se controla mediante los voltajes aplicados a los cañones de electrones en un tubo de rayos catódicos. Se hace hincapié en la relación exponencial entre voltaje y luminancia de cada primario introduciendo el concepto de *gammas del monitor*.

Con esto, asumiendo la constancia de la cromaticidad de los fósforos para cualquier nivel de voltaje (o luminancia), y la independencia entre los fósforos, es evidente que para tener totalmente caracterizado el funcionamiento del monitor, basta con determinar los parámetros de las curvas exponenciales de cada canal. Este modelo de monitor permite la calibración a partir de 3 medidas de cromaticidad y 3N medidas de luminancia (N medidas en cada canal aislado).

A continuación se estudia lo que ocurre en casos más complejos. Si la cromaticidad de los fósforos dependiera de la luminancia habría que tomar 3N medidas de la cromaticidad además de las 3N medidas de luminancia. Y si además no existiese aditividad, habría que tomar medidas con combinaciones de fósforos. Se resalta que el problema en estos casos no se limita a un proceso de medida más tedioso, sino que además, la obtención de los voltajes requeridos para generar un cierto color no es directa, sino que requiere de un proceso de aproximaciones sucesivas.

Conocida la relación exponencial entre voltaje y luminancia de los primarios y sabiendo (tema 7) que en los sistemas informáticos la luminancia de los primarios sólo puede tomar valores discretos con un máximo acotado, se analizan las limitaciones de los monitores para la generación de colores, tanto en gama de colores reproducibles como en precisión en la reproducción.

---

Bibliografía recomendada:

Artigas 02 [11], Capítulos 5 y 7  
Wandell 95 [2], Apéndice B  
Kang 97 [23], Capítulo 14  
Hunt 95 [22], Capítulo 12  
Malo y Luque 02 [15], Capítulos 2 y 3

---

### 5.2.4 Desarrollo de los contenidos (laboratorio)

---

PRÁCTICA 1: INSTRUMENTOS DE MEDIDA DEL COLOR

Tiempo aproximado: 3 horas

---

#### Objetivos

Manejar diferentes instrumentos de medida del color, comparar sus resultados y analizar el efecto del iluminante y la geometría de la medida. Obtener datos experimentales para su uso en sesiones posteriores.

#### Descripción

Los alumnos seleccionan un conjunto de muestras cromáticas opacas y transparentes y miden su reflectancia (o transmitancia) espectral y su color mediante espectrofotómetros y colorímetros. Mediante un tele-colorímetro se miden los valores triestímulo de las muestras opacas bajo dos iluminantes (lámpara incandescente y lámpara fluorescente) en diferentes geometrías.

Los alumnos deben reproducir los datos obtenidos por el colorímetro a partir de las medidas de las reflectancias, la geometría de la medida y los datos del espectro de emisión de las lámparas facilitados por el profesor.

#### Material

- Espectrofotómetro de reflexión *Macbeth* controlado por ordenador.
- Espectrofotómetro de transmisión *Spectronic*.
- Tele-colorímetro de filtros automático *Topcon*.
- Colorímetro de filtros *Elrepho*.
- (Sólo para uso del profesor) tele-espectrofotómetro *Pritchard*.
- Lámpara incandescente (flexo), lámpara fluorescente y cinta métrica para controlar la geometría de la iluminación.

#### Conexión con los temas de teoría

Esta práctica ilustra lo expuesto en el tema 6, poniendo de manifiesto la importancia de los aspectos prácticos, como la geometría de la medida o los detalles numéricos en el cálculo de la integral de los valores triestímulo.

Debido a que es la primera práctica, habitualmente se realiza antes de haber visto en clase el esquema de los aparatos de medida. No obstante, los alumnos si han repasado en el tema 1 la ecuación fundamental que liga el vector triestímulo de una muestra con su reflectancia y el iluminante que incide sobre ella.

---

PRÁCTICA 2:                   REPRODUCCIÓN DEL COLOR EN MONITORES

Tiempo aproximado:    3 horas

---

### **Objetivo**

Calibrar colorimétricamente un monitor CRT controlado por una VGA (dispositivo de reproducción aditiva del color).

Poner de manifiesto las limitaciones de la gama de colores reproducibles en un monitor.

### **Descripción**

Asumiendo un modelo de fósforos independientes de cromaticidad variable (que es aproximadamente correcto para la mayoría de los CRTs), los estudiantes generan los estímulos necesarios para obtener los parámetros de la calibración: la evolución de las coordenadas cromáticas de los primarios y las constantes de la relación exponencial entre luminancia y nivel digital.

Hallados estos parámetros, se comprueba la precisión del calibrado y se buscan los límites de la gama de colores reproducibles en el monitor.

### **Material**

- Sonda de luminancia y cromaticidad.
- Ordenador con MATLAB y COLORLAB para la generación de los estímulos y la obtención de los parámetros por mínimos cuadrados.

### **Conexión con los temas de teoría**

En esta práctica se resuelve el problema del calibrado de un dispositivo de reproducción del color tratado en el tema 8.

El motivo para situar esta práctica en segundo lugar (mucho antes de llegar al bloque de tecnología del color) es que los alumnos sean conscientes de que para reproducir colores de forma apropiada es necesario conocer los parámetros de la calibración del dispositivo.

De esta manera, los alumnos entienden de forma natural el significado de los parámetros de calibración requeridos por COLORLAB para la reproducción del color (fundamental para cualquier generación de colores en las siguientes prácticas).

PRÁCTICA 3: INTRODUCCIÓN A COLORLAB

Tiempo aproximado: 6 horas

---

### Objetivo

Dar una visión global de las potencialidades de la herramienta COLORLAB e iniciar a los alumnos en su uso mediante ejemplos sencillos.

### Descripción

Con objeto de recorrer las potencialidades de COLORLAB se plantea a los alumnos el problema de la reproducción de los colores de las muestras que midieron en la práctica 1.

Esta excusa sirve para mostrar como se trabaja con estímulos cromáticos (reflectancias e iluminantes), colores e imágenes en color.

Se ve como expresar los colores en cualquier representación triestímulo, y como representar gráficamente colores en espacios triestímulo y diagramas cromáticos. Además, utilizando los datos de la calibración del monitor, podemos reproducir los colores que queramos dentro de la resolución de la VGA. Así mismo se comenta la posibilidad de representar colores usando distintos modelos de apariencia de color.

Se hace hincapié tanto en los aspectos teóricos (cuales son los datos necesarios para hacer accesibles todas las representaciones, o cuales son las transformaciones necesarias para llegar a representar en pantalla un determinado color), como en los aspectos prácticos en el uso del programa (como se construyen imágenes en color, o como se cargan o guardan datos).

### Material

- Ordenador con MATLAB y COLORLAB.

### Conexión con los temas de teoría

El abanico de posibilidades cubierto por COLORLAB incluye conceptos de todo el primer bloque temático, especialmente la colorimetría triestímulo, tema 1, y los modelos de apariencia del color, tema 3. Además, el conocimiento de las transformaciones para llegar desde la descripción del estímulo a la reproducción del mismo, representa un ejemplo de los procesos descritos en los temas 5 y 8.

---

PRÁCTICA 4: EFECTO DEL ILUMINANTE EN DIFERENTES ESPACIOS DE REPRESENTACIÓN

Tiempo aproximado: 6 horas

---

### Objetivo

El objetivo es que el alumno experimente con los efectos del nivel de iluminación y la forma del espectro del iluminante en el color de un conjunto de muestras reflectantes, tanto en los estímulos en sí, como en su representación triestímulo y de apariencia.

### Descripción

Los alumnos disponen de un conjunto de teselas reflectantes con las que deben componer una imagen (patrón de estímulos relacionados) y representarla en diferentes condiciones de iluminación, variando la luminancia y forma de la radiancia espectral del iluminante.

Deben comprobar los efectos del iluminante en los vectores triestímulo y comprobar empíricamente, por observación de la reproducción en el monitor, si se siguen identificando los atributos originales a pesar del cambio de iluminante.

Deben calcular los atributos perceptuales en dos espacios triestímulo diferentes y en varios espacios de apariencia del color, para comprobar las limitaciones de la caracterización triestímulo.

También usan los modelos de apariencia para calcular pares correspondientes de las muestras bajo los diferentes iluminantes y así comprobar la calidad de los modelos.

### Material

- Ordenador con MATLAB y COLORLAB.

### Conexión con los temas de teoría

Las simulaciones de cambio de iluminante y el comprobación de la constancia (o inconstancia) del color de la representación y la reproducción de pares correspondientes ilustran los contenidos presentados en los temas 1-4.

PRÁCTICA 5: UNIFORMIDAD PERCEPTUAL DE DIFERENTES REPRESENTACIONES DEL COLOR

Tiempo aproximado: 3 horas

---

### Objetivo

Comprobar la uniformidad perceptual de diferentes espacios de representación del color.

### Descripción

Para ello se utilizan datos de elipses de McAdam (lugares geométricos de los puntos que equidistan de uno dado), y datos del Atlas Munsell (conjunto de colores con distancia perceptual uniforme entre las muestras).

En particular los alumnos cargan varios planos de tono constante para diferentes luminosidades y varios anillos de croma constante.

Un buen modelo debe hacer que los locus de discriminación sean esferas de igual tamaño para toda cromaticidad. Además las muestras Munsell deben quedar uniformemente repartidas en luminosidad, con las de un mismo tono contenidas en un plano y con las de igual croma en un plano o un cilindro.

### Material

- Ordenador con MATLAB y COLORLAB.
- Atlas Munsell para comparar (cualitativamente) las simulaciones con los originales.

### Conexión con los temas de teoría

Los experimentos numéricos presentados aquí constituyen ejemplos de uso de los modelos presentados en el tema 3 y del testeo de los modelos propuesto en el tema 4.

Además el trabajo con estas muestras implica una mejor comprensión del significado de las páginas del Munsell y los efectos Abney-Aubert, Bezold-Brucke, y Helmholtz-Kohlrausch (tema 1).

---

PRÁCTICA 6: SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COLORIMÉTRICOS CON  
COLORLAB

Tiempo aproximado: 9 horas

---

### Objetivo

El objetivo es que los alumnos relacionen los conceptos tratados en los temas dedicados a la caracterización numérica del color y los apliquen para solucionar problemas complejos, utilizando COLORLAB como una herramienta para desarrollar la intuición y facilitar los cálculos y la presentación de resultados.

### Descripción

Esta práctica tiene un planteamiento abierto. En lugar de seguirse un guión para estudiar ciertos fenómenos o modelos, aquí se plantean problemas que los alumnos deben resolver en grupos haciendo uso de los conocimientos y herramientas tratadas durante el curso.

Cada pareja o trio de estudiantes debe resolver alguno de los siguientes problemas (u otros de complejidad similar):

- Edición de la apariencia del color de una región de una imagen. Cambio del colorido, la luminosidad o el tono en un espacio perceptual.
- Evaluación de errores de reproducción del color en escenas complejas, bajo cambio de iluminante o distorsiones aleatorias de los valores tristímulo.
- Generación de estímulos para el estudio del fenómeno de la inducción y descripción de la inducción en espacios de apariencia del color. Reproducción de los resultados de Heinemann (práctica 2 de *Psicofísica*).
- Generación de redes púramente acromáticas o púramente cromáticas asumiendo un cierto modelo.
- Limitación de la anchura de banda en imágenes en color.

### Material

- Ordenador con MATLAB y COLORLAB.

### Conexión con los temas de teoría

En estos ejercicios se manejan los conceptos presentados en los temas 1-3 y al reproducir imágenes en el monitor o seleccionar espacios de representación cromática se tratan algunos de los problemas abordados en los temas 5, 7 y 8.

## 5.3 Percepción Visual

### 5.3.1 Cuadro Sinóptico

PERCEPCIÓN VISUAL
CARÁCTER: Troncal CRÉDITOS: 4.5 teóricos + 1.5 prácticos UBICACIÓN: Quinto semestre (Primer semestre del tercer curso) MATERIA BOE: Estructura y Función del Sistema Visual. DESCRIPTORES BOE: El sistema visual como integrador de sensaciones.
OBJETIVOS
El objetivo de la asignatura <i>Percepción visual</i> es que el alumno conozca y maneje los conceptos básicos que se emplean en la construcción de modelos cuantitativos de percepción visual. En esta asignatura se presentan a nivel introductorio los modelos matemáticos de las primeras etapas del procesado de la información visual en el cerebro. Así mismo, se interpretan estos comportamientos como una consecuencia de la adaptación del sistema visual a la naturaleza de las imágenes a las que se enfrenta.
TEMARIO
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sesiones teóricas (45 horas)           <ul style="list-style-type: none"> <li>– Modelos fisiológicos y modelos estadísticos (1 tema, 2 horas)</li> <li>– Preliminares matemáticos (3 temas, 15 horas)</li> <li>– Modelos fisiológ. de percepción de textura (3 temas, 14 horas)</li> <li>– Modelos estadíst. de percepción de textura (2 temas, 11 horas)</li> <li>– Modelos de percepción de movimiento (1 tema, 4 horas)</li> </ul> </li> <li>• Sesiones prácticas (15 horas, 3 horas/sesión)           <ul style="list-style-type: none"> <li>– Práctica 1: Imágenes como matrices y vectores.</li> <li>– Práctica 2: Análisis de Fourier 2D y 3D.</li> <li>– Práctica 3: Campos receptivos en el LGN y CSFs.</li> <li>– Práctica 4: Representación de la información en el córtex.</li> <li>– Práctica 5: Descorrelación y campos receptivos.</li> </ul> </li> </ul>
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA
Wandell 95 [2]    Landy y Movshon 91 [24]    Spillmann 90 [6] Strang 98 [25]    Pratt 91 [17]

EVALUACIÓN
<p>La nota final pondera el conocimiento de los conceptos teóricos (75%) y la capacidad de los alumnos para aplicarlos y analizar los resultados (25%) de acuerdo con la distribución de créditos teóricos y prácticos de la asignatura. Los conocimientos teóricos se evalúan mediante un examen de cuestiones. El dominio práctico de los conceptos se evalúa mediante una memoria en la que se describe el comportamiento de los modelos con los que se ha trabajado en el laboratorio. Esta nota puede complementarse de forma voluntaria mediante la presentación de pequeños programas (macros) basados en los bloques elementales que se han analizado por separado.</p>
INTERACCIONES CON ASIGNATURAS PREVIAS (Ver Fig. 2.1)
<p><b>Psicofísica de la Visión</b> (troncal, tercer semestre): El conocimiento de la fenomenología presentada en <i>Psicofísica</i> es requisito fundamental antes de estudiar los modelos destinados a dar cuenta de dicha fenomenología.</p> <p><b>Matemáticas</b> (troncal, primer y segundo semestres): La naturaleza de los modelos presentados en <i>Percepción Visual</i> es geométrica y estadística, por lo tanto, resultan fundamentales ideas como los espacios vectoriales, las transformaciones lineales de cambio de representación (giros), o las funciones densidad de probabilidad multidimensionales. Además, como la parte cuantitativa en <i>Percepción Visual</i> se aborda de forma numérica, resulta muy conveniente la desentovtura en el uso de MATLAB supuestamente adquirida en las prácticas de <i>Matemáticas</i>.</p> <p><b>Neurofisiología de la Visión</b> (troncal, primer semestre): Un conocimiento elemental de las propiedades del LGN y el córtex es interesante para justificar las etapas lineal y no lineal de los modelos presentados en <i>Percepción</i>.</p> <p><b>Colorimetría y Visión del Color</b> (optativa, segundo semestre): Aunque no es crucial, <i>Colorimetría</i> resulta conveniente porque: (1) refuerza el concepto de representación de estímulos en un espacio, la medida de distancias entre ellos y pone de manifiesto la insuficiencia de los modelos lineales, y (2) consolida el uso de MATLAB como herramienta para explorar el comportamiento de modelos matemáticos.</p>
INTERACCIONES CON ASIGNATURAS POSTERIORES (ver Fig. 2.1)
<p><b>Métodos no Invasivos de Diagnóstico Clínico</b> (optativa, sexto semestre): El estudio de los sistemas lineales efectuado en <i>Percepción</i> resulta útil para entender las técnicas de diagnóstico basadas en la medida de funciones de transferencia. Además, el trabajo numérico con imágenes desarrollado en <i>Percepción</i> ahorra tiempo en <i>Métodos</i> a la hora de abordar la generación de estímulos espaciales por ordenador.</p> <p><b>Aplicaciones Clínicas del Tratamiento de Imágenes</b> (optativa, sexto semestre): Los conceptos de procesado de imágenes introducidos en <i>Percepción Visual</i> resultan de gran utilidad para <i>Aplicaciones Clínicas</i> porque los alumnos ya se han familiarizado con las imágenes discretas, la transformada de Fourier y el efecto de los filtros espaciales.</p>

### 5.3.2 Descripción de los bloques temáticos

El objetivo de la asignatura *Percepción visual* es que el alumno conozca y maneje los conceptos básicos que se emplean en la construcción de modelos cuantitativos de percepción visual.

En esta asignatura se pretende presentar a nivel introductorio los modelos matemáticos que describen las primeras etapas del procesado de la información visual en el cerebro. Así mismo, analizando la mejor forma de representar las imágenes naturales, se interpreta el comportamiento como una consecuencia de la adaptación del sistema visual a la estadística de las imágenes a las que se enfrenta.

Para todo ello, se combinan las sesiones teóricas (45 horas) con sesiones prácticas (15 horas) diseñadas para que el alumno acabe de entender, mediante la experimentación numérica, los conceptos matemáticos presentados en las clases teóricas.

La materia presentada en las sesiones de teoría se organiza en 5 bloques temáticos.

- Bloque 1: Modelos fisiológicos frente a modelos estadísticos.
  - Tema 1: Modelos fisiológicos frente a modelos estadísticos.
- Bloque 2: Preliminares matemáticos: álgebra lineal y sistemas lineales para percepción visual.
  - Tema 2: Imágenes y secuencias como vectores.
  - Tema 3: Representaciones lineales de imágenes.
  - Tema 4: Representación de sistemas lineales.
- Bloque 3: Modelos fisiológicos y psicofísicos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas.
  - Tema 5: Respuesta de un sistema de células: campos receptivos y saturación.
  - Tema 6: Representación lineal de imágenes en el sistema visual.
  - Tema 7: No linealidades en el sistema visual.
- Bloque 4: Modelos estadísticos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas.
  - Tema 8: Descorrelación y campos receptivos.
  - Tema 9: Información aceptada y rechazada por el sistema visual.
- Bloque 5: Modelos de percepción de movimiento de bajo nivel.
  - Tema 10: Flujo óptico a partir de la respuesta de los filtros corticales.

En el primer bloque se plantean las dos aproximaciones básicas que se utiliza en ciencias de la visión al abordar la interpretación de la fenomenología de la percepción visual. En el segundo bloque se repasa la herramienta matemática necesaria para la comprensión de los modelos.

En el tercer bloque se modeliza el funcionamiento del córtex visual como un sistema de detectores lineales con interacciones no lineales entre las respuestas de este sistema. En el cuarto bloque se deduce la forma de los campos receptivos y el espacio de representación cromática oponente como resultado de un proceso de descorrelación. Además se interpretan las limitaciones en la resolución de los canales como una eliminación selectiva de información.

En el último bloque se muestra como usar la representación descrita en los bloques 3 y 4 para el cálculo del flujo óptico.

### **Bloque 1: Modelos fisiológicos frente a modelos estadísticos**

Este bloque, con un único tema también titulado, '*Modelos Fisiológicos frente a Modelos Estadísticos*', introduce las aproximaciones básicas que se usan para abordar la interpretación de la fenomenología de la percepción visual. Los modelos fisiológicos son aquellos que se centran en la descripción del comportamiento de las células de los caminos visuales. Los modelos estadísticos explican (no sólo describen) dicho funcionamiento tratando de deducirlo usando argumentos de eficiencia en el procesado de la información.

### **Bloque 2: Preliminares matemáticos, álgebra lineal y sistemas lineales para percepción visual**

En el primer tema de este bloque, '*Imágenes y Secuencias como Vectores*', se presenta la notación vectorial de las imágenes a través del muestreo, y se repasa el concepto de producto escalar (fundamental para entender la actuación de los detectores lineales).

En el segundo tema del bloque, '*Representaciones Lineales de Imágenes*', tratamos el tema del cambio de base en el espacio vectorial de imágenes definido en el tema anterior, presentando representaciones alternativas al dominio espacial. Se demuestra que cuando las funciones base son ortogonales, los coeficientes de las imágenes en la nueva representación vienen dados por productos escalares con las funciones base.

Por último, en el tercer tema del bloque, '*Representación de Sistemas Lineales*', nos dedicamos a ver como funciona un sistema lineal y resaltamos las ventajas que supone analizarlo en su representación propia. Vemos que la representación de Fourier es propia de sistemas invariantes a desplazamientos, mientras que para sistemas variantes las funciones de la base propia están localizadas.

### **Bloque 3: Modelos fisiológicos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas**

En el tema, '*Respuesta de un Sistema de Células: Campos Receptivos y Saturación*', primero de este bloque, se presenta la forma general de la respuesta de una célula, con su parte lineal y no lineal. Como consecuencia de esto, en función de las propiedades de los campos receptivos, la actuación del sistema de células puede verse como la aplicación de una distorsión o como un cambio de representación.

En el tema siguiente, '*Representación Lineal de Imágenes en el Sistema Visual*', se describe la forma de los campos receptivos a nivel de LGN y córtex, deduciéndose las CSFs y presentándose la representación wavelet cortical.

En el último tema del bloque, '*No Linealidades en el Sistema Visual*', se describe la forma de las no linealidades que se aplican tras la etapa de respuesta lineal tanto en el caso espacial como en el cromático.

### **Bloque 4: Modelos estadísticos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas**

En el primer tema de este bloque, '*Descorrelación y Campos Receptivos*', se enuncia la hipótesis de Barlow sobre el principio de economía que debe regir la organización del sistema visual. Dicha hipótesis parece razonable puesto que minimizando la correlación se obtienen canales cromáticos oponentes y campos receptivos oscilantes.

En el segundo y último tema del bloque, '*Información Aceptada y Rechazada por el Sistema Visual*', analizamos los efectos del muestreo retiniano, de las CSFs y de la resolución limitada de los canales de frecuencia en términos de la teoría de la información. Para ello introducimos primero las medidas de información necesarias: relacionadas con la anchura de banda, y con la incertidumbre eliminada por la señal.

### **Bloque 5: Modelos de percepción de movimiento de bajo nivel**

En el único tema de este bloque, '*Flujo Óptico a partir de la Respuesta de los Filtros Corticales*', se analizan los modelos de cálculo de desplazamientos 2D: la unidades de Reichardt (caracterizadas en el dominio espacio-temporal), y los modelos frecuenciales de Watson-Ahumada y Heeger. Usando estos modelos es posible interpretar los datos de máximos desplazamientos perceptibles y los umbrales de coherencia en el movimiento.

### **Sesiones de laboratorio**

El objetivo de las sesiones prácticas es presentar a los alumnos un software (funciones genéricas de MATLAB o pequeñas funciones desarrolladas para la ocasión) mediante el cual pueden experimentar con los conceptos presentados en teoría.

Durante estas sesiones se les plantean los problemas a tratar y se les orienta en el uso de la herramienta. La idea no es que los alumnos completen totalmente el trabajo durante las sesiones prácticas, sino que continuen el trabajo en casa o aprovechando su acceso al aula de informática.

- Práctica 1: Imágenes como matrices y vectores.
- Práctica 2: Análisis de Fourier 2D y 3D.
- Práctica 3: Campos receptivos en el LGN y CSFs.
- Práctica 4: Representación de la información en el córtex.
- Práctica 5: Descorrelación y campos receptivos.

### 5.3.3 Desarrollo de los contenidos (teoría)

---

Bloque 1:	<i>Modelos fisiológicos frente a modelos estadísticos</i>
TEMA 1:	MODELOS FISIOLÓGICOS FRENTE A MODELOS ESTADÍSTICOS
Tiempo aproximado:	<i>2 horas</i>

---

- 1.1 Aproximaciones posibles a la modelización de la percepción de bajo nivel.
  - 1.2 Modelos empíricos: fisiología. Modelo elemental de las respuestas de las células del camino visual.
  - 1.3 Modelos estadísticos: operaciones necesarias para el procesado eficiente de la información visual.
- 

El objetivo de este breve tema introductorio es presentar las dos aproximaciones básicas con las que se aborda el problema de la modelización de la percepción a bajo nivel (modelos *fisiológicos* y modelos *estadísticos*), y resaltar las conexiones entre ellas.

Por una parte, la *aproximación fisiológica* trata de explicar los fenómenos mediante modelos de la respuesta de las células del camino visual retina-córtex: LGN, V1, MT. Por otro lado, la *aproximación estadística* parte de la base de que los mecanismos de análisis de la información visual han debido adaptarse para procesar adecuadamente los estímulos a los que se enfrenta el sistema (las imágenes naturales) con objeto de efectuar adecuadamente tareas de representación y clasificación.

La conexión es importante por dos motivos, uno técnico y otro fundamental. Desde el punto de vista técnico, las herramientas matemáticas necesarias en ambas aproximaciones (fundamentalmente espacios vectoriales y álgebra lineal) van a ser las mismas. Y lo que es más importante, desde el punto de vista fundamental, lo interesante es que ambas aproximaciones llegan a soluciones semejantes porque los mecanismos fisiológicos pueden interpretarse en función de las tareas que desempeñan.

Dicho esto, se recuerda brevemente a los alumnos la estructura de los caminos visuales retina-córtex (que conocen de su estudio de la asignatura troncal *Neurofisiología*) y se cita (sin entrar en detalles, que se darán en el tema 5) el modelo básico de funcionamiento de las células de estos caminos.

Para finalizar el tema, se exponen los elementos, o etapas, de un sistema de visión que debe resolver problemas de clasificación (decidir cual de una serie de

objetos posibles está en una escena dada): sensores, extracción de características y clasificador.

El sistema de sensores realiza medidas de la escena. En nuestro caso se trata de un sistema óptico que forma la imagen de la escena sobre un conjunto de fotodetectores que dan una respuesta para cada posición espacial de la imagen.

El proceso de extracción de características es una transformación de los datos que provienen de los sensores combinándolos para dar lugar a señales que representen características del objeto. De este modo se mejora la representación de la escena facilitando el proceso de clasificación. El resultado de esta etapa es la representación de la escena como un punto en un espacio de características.

El clasificador no es más que una partición del espacio de características de modo que cada región está asociada a un objeto de los posibles.

Lo más relevante para la aplicación de estas ideas a la interpretación de la percepción visual es que las transformaciones efectuadas en la extracción de características deben estar adaptadas a la naturaleza de las imágenes con las que se enfrenta el sistema. Por motivos de economía, dicha representación debe ser eficiente, es decir, las diferentes características del dominio de representación deben ser independientes. En el tema 8 veremos que aplicando estos principios a las imágenes naturales se deduce la forma elemental de los campos receptivos de las células del córtex.

---

Bibliografía recomendada:

Marr 80 [8], Capítulo 1  
Duda 72 [26], Capítulo 1

---

---

Bloque 2: *Preliminares matemáticos: álgebra lineal y sistemas lineales para percepción visual*

TEMA 2: IMÁGENES Y SECUENCIAS COMO VECTORES

Tiempo aproximado: *3 horas*

---

2.1 Dominio e imagen (dominio y función).

2.2 Imágenes (funciones) sobre un dominio discreto.

2.2.1 Dominio discreto: frecuencia de muestreo.

2.2.2 Las imágenes son matrices  $N \times N$  o vectores  $N^2 \times 1$ .

2.3 Espacio vectorial de imágenes.

2.3.1 Superposición de imágenes: suma de vectores.

2.3.2 Variación de la irradiancia: producto por un escalar.

2.3.3 Energía de una imagen: módulo del vector.

2.3.4 Distancia entre imágenes: módulo del vector diferencia.

2.4 Producto escalar de imágenes.

2.4.1 Producto escalar. Energía de una imagen y diferencia entre imágenes en función del producto escalar.

2.4.2 Ángulos en el espacio de imágenes. Ortogonalidad.

2.4.3 Producto escalar como medida de la presencia de una imagen en otra.

---

El objetivo del primer tema de este bloque es presentar la idea de que las imágenes pueden considerarse como vectores donde la suma vectorial representa la superposición de irradiancias y el producto por un escalar significa un simple incremento de la irradiancia.

Además de la introducción de la notación que emplearemos durante el curso, el otro concepto central de este tema es comprender el producto escalar como proyección de una imagen sobre otra, siendo este una medida de la presencia de una imagen en otra la otra. Este concepto es fundamental para entender la actuación de los campos receptivos de las células como analizadores del contenido de las imágenes.

En primer lugar empezamos definiendo una imagen como una función de irradiancia en el dominio espacial continuo.

Para que los espacios resultantes no sean de dimensión infinita (concepto desconocido por los alumnos, y que puede resultar difícil para ellos) antes de plantear la expresión vectorial de las imágenes se introduce el concepto de muestreo. Naturalmente el muestreo se introduce de forma muy sencilla, sólo en el caso cartesiano y sin tener en cuenta todas sus implicaciones (algunas de las cuales se tratarán en el tema 9).

Tan sólo se define el concepto de frecuencia de muestreo y se hace ver que el resultado del muestreo es una matriz de datos. La introducción del muestreo en el espacio no resulta artificiosa porque se hace referencia al mosaico de fotorreceptores en la retina: el inicio del proceso visual es lógicamente una matriz de datos.

Una vez visto esto, una simple reordenación de los datos basta para considerar una imagen como un vector. Se muestran ejemplos de como es posible hacer y desacer esta reordenación. Se hace hincapié en que aunque las relaciones entre los vecinos en la señal original han cambiado, no hemos perdido información con la reordenación porque el índice del vector contiene la información espacial 2D. Utilizaremos una u otra expresión (la vectorial o la matricial) cuando convenga para simplificar la matemática o mejorar la intuición sobre el problema. La primera sesión de prácticas de esta asignatura se dedica a que los alumnos trabajen con esta expresión de las imágenes.

Al generalizar el muestreo a la dimensión tiempo se recalca que se hace por motivos de conveniencia, ya que como los alumnos saben que en el sistema visual cada fotodetector da una respuesta continua (no muestreada) en el tiempo.

Aquí se hace hincapié en que los alumnos no confundan la dimensión del dominio (2D en imágenes o 3D en secuencias) con la dimensión del vector que representa a la imagen. No obstante, se señala que al hablar de la complejidad del proceso visual normalmente se hace referencia precisamente a la alta dimensionalidad de estos vectores (al gran número de datos que constituyen la entrada de los caminos visuales).

Una vez descritos los inputs como vectores, se presenta la suma (y resta) de imágenes y el producto de imágenes por un escalar. Se relaciona la energía de una imagen con el módulo del vector que la representa y la diferencia entre imágenes con el módulo del vector diferencia.

Finalmente se revisa el concepto de producto escalar y ángulos en el contexto de imágenes recién introducido. Como he dicho, se hace hincapié en el hecho de que a mayor proyección (mayor producto escalar), mayor similitud entre las imágenes.

## Bibliografía recomendada:

Anshel 97 [27], Capítulo 1  
Strang 98 [25], Capítulo 1  
Pratt 91 [17], Capítulo 5  
Thompson y Shure 93 [19], Capítulo 1

---

---

Bloque 2: *Preliminares matemáticos: álgebra lineal y sistemas lineales para percepción visual*

TEMA 3: REPRESENTACIONES LINEALES DE IMÁGENES

Tiempo aproximado: 5 horas

---

3.1 Imágenes (funciones) base.

3.2 Representaciones lineales de una imagen.

3.2.1 Que es una representación de una imagen?.

3.2.2 Representación de una imagen en el dominio espacial.

3.2.3 Cambio de representación (lineal): cambio de base.

3.3 Bases ortogonales.

3.3.1 Definición y consecuencia sobre la matriz de transformación.

3.3.2 La transformación es fácil de calcular: la representación de una imagen en una base ortogonal se calcula mediante simples productos escalares de las funciones base por la imagen.

3.3.3 Las transformaciones ortogonales son giros: conservan la energía, las distancias y los ángulos.

3.4 Utilidad de los cambios de representación.

3.4.1 Las funciones base pueden contener información relevante. Ejemplos: base de deltas en el dominio espacial y base de funciones coseno.

3.4.2 Utilidad: poner la información de la imagen en función de la información contenida en las funciones base.

---

Después de haber visto en el tema 2 que las imágenes pueden representarse como vectores, en este tema se reflexiona sobre el significado de expresar esos vectores respecto de diferentes bases en el espacio vectorial de imágenes recién presentado.

El concepto de cambio de representación es importante para la comprensión de los modelos de percepción visual por tres motivos: (1) La actuación del sistema de detectores aplicado en las primeras etapas del proceso visual, que veremos en el tema 6, puede entenderse como un cambio de representación. (2) Como veremos en el tema 8, dada una cierta clase de imágenes, un adecuado cambio de representación (un adecuado sistema de detectores) puede resaltar las características relevantes de las imágenes dando además un conjunto de

respuestas independientes. (3) Finalmente, desde un punto de vista técnico, como veremos en el tema siguiente, la actuación de un sistema sobre una señal (en nuestro caso el sistema visual sobre las imágenes) puede describirse mejor (más intuitivamente) en su *representación propia*.

En primer lugar se introduce el concepto de *base*: una base es un conjunto de vectores (imágenes) linealmente independientes capaces de generar todo el espacio. De esta forma, cualquier imagen puede ponerse como suma de estas imágenes base pesadas por un factor adecuado.

Estos factores de peso de cada imagen base son las *componentes* de la imagen en la base.

Se presentan diferentes expresiones para esta combinación lineal, y en particular se hace hincapié en la expresión matricial que relaciona el vector imagen con el vector de componentes a través de la matriz formada por las funciones base en columnas.

Después introducimos el concepto de representación: una representación es la expresión (el conjunto de componentes) que caracteriza a una imagen en una cierta base.

Como primera representación intuitiva presentamos formalmente la representación de imágenes en el dominio espacial. Para ello definimos la función delta, punto luminoso de irradiancia unidad en una determinada posición. Se demuestra que las componentes de la imagen en la base de funciones delta son simplemente las irradiancias de la imagen en cada punto, por tanto esta es la representación de la imagen en el dominio espacial.

Después de este ejemplo de representación, se presenta la expresión para el cálculo de las componentes de una imagen en cualquier base (expresión del cambio de base). La nueva representación se obtiene mediante la inversa de la matriz cuyas columnas son las imágenes (vectores) base.

A continuación definimos el concepto de ortogonalidad (y ortonormalidad). De él se deduce que si elegimos una base ortonormal, la matriz de cambio de base es simplemente la traspuesta de la matriz de imágenes base.

Esto es interesante, porque, en ese caso, las componentes en la nueva representación se hallan simplemente haciendo productos escalares de la imagen con las funciones base (que como veremos en los temas 5 y 6 son básicamente las operaciones que efectúan las células del córtex). Además, las transformaciones ortonormales pueden interpretarse como giros (conservan energías, ángulos y distancias).

La consecuencia de todo esto es que, la aplicación (producto escalar) de funciones ortogonales sobre una imagen nos da cual es la representación de la imagen en la nueva base (girada respecto de la original), y, sabiendo el significado del producto escalar, lo que ocurre es que cada componente nos informa sobre la presencia relativa de cada función base en la imagen considerada.

Teniendo esto en cuenta, un cambio de representación significa el análisis de la imagen en términos de la base. Sabiendo que las imágenes base pueden contener información cualitativa relevante, un cambio de representación puede ser útil para interpretar el contenido de la imagen.

Para ilustrar estos conceptos se presentará un ejemplo donde se analizará en detalle la representación de dos imágenes esencialmente distintas (puntos luminosos aislados -cielo estrellado- y una textura periódica -ventanales de un edificio-) para ser representadas en dos bases ortonormales con diferente significado, la base de deltas y la base de funciones DCT. Este ejemplo es muy didáctico porque representa a la perfección la idea de que el tipo de representación adecuado depende esencialmente del tipo de imágenes que tratemos. Volveremos sobre esto en el tema 8.

---

Bibliografía recomendada:

Strang 98 [25], Capítulos 1, 3, 4 y 7  
Pratt 91 [17], Capítulos 7 y 8  
MathWorks 96 [28], Capítulo 4

---

---

Bloque 2: *Preliminares matemáticos: algebra lineal y sistemas lineales para percepción visual*

TEMA 4: REPRESENTACIÓN DE SISTEMAS LINEALES

Tiempo aproximado: *6 horas*

---

#### 4.1 Que es un sistema lineal?.

4.1.1 Expresión general, kernel e integral de superposición.

4.1.2 Ejemplo: pasa baja foveal (espacialmente variante).

#### 4.2 Representación propia de un sistema lineal.

4.2.1 Funciones propias y valores propios del sistema.

4.2.2 Representación propia del sistema. La integral de superposición se convierte en un producto (por un filtro) en la base propia.

4.2.3 Representaciones de la actuación de un sistema.

#### 4.3 Sistemas lineales invariantes a desplazamientos (SLID).

4.3.1 Definición. Kernel constante (respuesta impulsional) y convolución.

4.3.2 Ejemplo: pasa baja de anchura constante.

4.3.2 Las exponenciales complejas (base de Fourier) son funciones propias de un SLID.

4.3.3 SLIDs en el dominio de Fourier: convolución, transformada de Fourier y filtros.

4.3.4 Propiedades de la transformada de Fourier n-D y de los filtros mediante ejemplos.

#### 4.4 Las funciones propias de los sistemas lineales espacialmente variantes están localizadas en el espacio.

---

El objetivo de este tema es doble, por un lado presentar el comportamiento genérico de un sistema lineal, y por otro, presentar las representaciones que simplifican la descripción del sistema, deduciendo que la representación de Fourier es adecuada para el análisis de sistemas lineales *invariantes a desplazamientos*, pero en casos más generales (habituales en percepción visual) serán más convenientes otras representaciones.

La notación vectorial de las imágenes introducida en los temas anteriores facilita enormemente esta tarea porque la actuación del sistema queda representada mediante una matriz y la mejor base para representarlo es simplemente la base de funciones propias de dicha matriz.

Además de esto, las técnicas presentadas aquí son las mismas que se usarán en el tema 8 (y en la práctica 4) para entender la adaptación de los mecanismos corticales a las imágenes naturales.

En primer lugar se presenta el funcionamiento de un sistema lineal en el dominio espacial mediante la integral de superposición. La función que da cual es la contribución de cada componente de la entrada en cada componente de la salida es el kernel del sistema. Se hace hincapié en la dificultad de la interpretación de la actuación del sistema expresado de esta forma porque el kernel puede ser arbitrariamente complejo.

A continuación se expresa esta relación de forma matricial y se muestra explícitamente un ejemplo de un sistema espacialmente variante en esta notación: un sistema foveal con resolución decreciente (que introduce emborronamiento) hacia los bordes.

Después de la definición de un sistema lineal genérico y su descripción matricial, presentamos cual es la forma de simplificar su descripción. Para ello interpretamos los conceptos de funciones propias y valores propios (que los alumnos han adquirido en *Matemáticas*), en el contexto de sistemas que procesan imágenes: las funciones propias del sistema son aquellas tales que el único efecto del sistema sobre ellas es producirles una atenuación.

De esta forma, el uso de la base de funciones propias para la diagonalización de la matriz del sistema nos da una visión intuitiva de su funcionamiento: El efecto (complicado) del sistema sobre una imagen en el dominio espacial se reduce a: (1) transformación de la imagen a la base de funciones propias, (2) atenuación de los coeficientes de la imagen mediante la función filtro (los valores propios del sistema), y (3) vuelta al dominio espacial mediante la transformación inversa.

Visto esto en general, en el apartado siguiente particularizamos los resultados para el caso de sistemas lineales invariantes a desplazamientos.

En este caso la función kernel, respuesta impulsional, es independiente de la posición espacial (y eventualmente temporal), y la integral de superposición se reduce a una convolución.

Se muestra un ejemplo (desenfoque gaussiano homogéneo) para mostrar la forma de la matriz en estos casos.

A continuación se muestra que las exponenciales complejas (base de Fourier) son funciones propias de un sistema lineal invariante a desplazamientos, y que sus valores propios (función filtro) son la transformada de Fourier de la respuesta impulsional, justificando la caracterización de estos sistemas como filtros en el dominio de Fourier.

Llegados a este punto, hacemos un paréntesis en el uso de la notación vectorial de las imágenes para repasar las propiedades de la transformada de Fourier n-D presentadas por primera vez en *Psicofísica*.

En la práctica 2 verificarán estas propiedades en el ordenador, especialmen-

te las propiedades de escalado en el dominio espacial y frecuencial, que son fundamentales para entender la forma de los campos receptivos corticales.

Para finalizar el tema, analizando las funciones propias obtenidas en los dos ejemplos considerados, se resalta el hecho de que, mientras que en los sistemas espacialmente invariantes las funciones propias son extendidas, en el caso de los sistemas variantes las funciones propias necesariamente deben ser localizadas.

---

Bibliografía recomendada:

Strang 98 [25], Capítulo 6  
Pratt 91 [17], Capítulo 9  
Gonzalez 87 [18], Capítulo 3  
Escalera 01 [16], Capítulo 4  
Thompson y Shure 93 [19], Capítulo 1  
MathWorks 96 [28], Capítulo 4

---

---

Bloque 3: *Modelos fisiológicos y psicofísicos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas*

TEMA 5: RESPUESTA DE UN SISTEMA DE CÉLULAS: CAMPOS RECEPTIVOS Y SATURACIÓN

Tiempo aproximado: 4 horas

---

5.1 Actividad de las células: pulsos, excitaciones e inhibiciones.

5.2 Modelo básico en dos etapas: integración lineal + respuesta con saturación.

5.3 Respuesta lineal de una célula.

5.2.1 Parte lineal: integración de respuestas. Campo receptivo.

5.2.2 Factores espaciales, temporales y espectrales en el campo receptivo. Separabilidad.

5.2.3 Células sintonizadas a posiciones y células sintonizadas a características (posiciones y frecuencias).

5.2.4 Punto neutro de una célula.

5.4 Respuesta lineal de un sistema de células.

5.3.1 La respuesta de un sistema de células sintonizadas a posiciones puede verse como la actuación de un sistema lineal.

5.3.2 La respuesta de un sistema de células sintonizadas a características puede verse como un cambio de representación.

5.5 Saturación (no-lineal) tras la etapa lineal. Modelos de normalización.

---

En este tema presentamos la forma general de la respuesta de las células de los caminos visuales usando la formulación introducida en los temas anteriores. En los temas 6 y 7 se particulariza esta forma en los casos del LGN y el córtex y se aplica la misma formulación a los detectores abstractos de la psicofísica, completándose así los rasgos generales del modelo estándar actual.

En primer lugar se recuerda que las neuronas responden en términos de número de pulsos por unidad de tiempo, y que pueden codificar señales positivas o negativas incrementando o disminuyendo esa tasa de pulsos respecto de la actividad espontánea, es lo que se conoce como excitación e inhibición.

A continuación se describe la estructura básica de una célula, que sugiere inmediatamente el planteamiento de un modelo de integración de las señales que llegan al detector. El modelo de funcionamiento de esta estructura contiene

una etapa de integración lineal y una respuesta (lineal o no lineal) al resultado de dicha integración.

Primero se aborda en detalle la etapa lineal para una sola célula. Dado un estímulo (imagen) la respuesta de una célula se identifica con el producto escalar del campo receptivo de la célula con el vector imagen, es la integral de superposición.

En este caso, se resalta la riqueza del campo receptivo que puede contener factores espaciales, temporales y espectrales, que pueden estar mezclados de forma no separable.

Partiendo de la expresión del producto escalar se ve que podemos medir la forma del campo receptivo registrando la respuesta de la célula cuando es estimulada mediante estímulos delta (espacial, temporal y espectral).

Así mismo, se resalta el hecho de que un determinado detector en general estará sintonizado (será fundamentalmente sensible) a la presencia de estímulos en una cierta posición espacial, pero además (usando el concepto de producto escalar), dará más respuesta ante determinados estímulos (aquellos que estén en la dirección del campo receptivo). Es decir, la forma del campo receptivo define características (como por ejemplo frecuencia espacial) a las que es sensible el detector.

Este hecho lleva de forma natural a la posibilidad de que diferentes estímulos no nulos pueden provocar respuesta nula (espontánea) en el detector porque sus diferentes contribuciones excitatorias e inhibitorias se cancelen al hacer la integral de superposición.

No debe resultar sorprendente que se obtengan ceros en la respuesta a estímulos monocromáticos uniformes (puntos neutros) debido a la cancelación de contribuciones espaciales de signos opuestos y sensibilidades espectrales diferentes. En el tema siguiente se presentarán ejemplos concretos de este hecho.

Una vez visto el comportamiento de una célula aislada, la respuesta de un sistema de células es tan sólo un conjunto de estas respuestas individuales. Tenemos por lo tanto un vector respuesta, y, en la terminología presentada en los temas anteriores el campo receptivo de cada célula es una fila de la matriz global que describe al sistema. El sistema de células es una transformación de un vector de entrada (estímulo) en un vector de salida (respuestas).

Haciendo estas consideraciones, el sistema de detectores puede verse como un sistema lineal que distorsiona la entrada o como un cambio de representación de la entrada dando lugar a un conjunto de respuestas que revelan la presencia de ciertas características en la entrada. La primera imagen será conveniente al considerar detectores sensibles a posiciones espaciales (con campos receptivos no ortogonales), y la segunda será más conveniente al considerar detectores sensibles a características independientes (campos receptivos aproximadamente ortogonales).

En el tema siguiente veremos que estas visiones alternativas pueden aplicarse respectivamente a los detectores del LGN y el CórteX.

Para finalizar el tema abordamos la segunda etapa comentada al principio: la respuesta tras la integración. Se plantean aquí las aproximaciones que se han propuesto de menor a mayor complejidad: (1) respuesta puramente lineal a la salida de la integración, (2) respuesta sigmoide, saturación, independiente para cada detector, y (3) respuesta sigmoide dependiente de la salida de detectores vecinos (modelos de normalización con interacción entre las células).

Aquí se da simplemente un listado de expresiones y su efecto se analizará más en detalle en los temas 7 y 8.

---

Bibliografía recomendada:

Landy y Movshon 91 [24], Parte III  
Wandell 95 [2], Capítulos 5, 6 y 9  
Spillmann 90 [6], Capítulos 8, 10 y 11

---

---

Bloque 3: *Modelos fisiológicos y psicofísicos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas*

TEMA 6: REPRESENTACIÓN LINEAL DE IMÁGENES EN EL SISTEMA VISUAL

Tiempo aproximado: 5 horas

---

### 6.1 Campos receptivos en el LGN.

- 6.1.1 Campos receptivos con simetría circular centro periferia, oponencia espectral y parte temporal separable.
- 6.1.2 Células de tipo I, II y III.
- 6.1.3 Sensibilidad espectral y puntos neutros.

### 6.2 CSFs espacio-temporales y cromáticas.

- 6.2.1 Obtención de las CSFs a partir de la respuesta de las células. Modelo de Martínez Uriegas.
- 6.2.2 CSFs espacio-temporales y cromáticas.

### 6.3 Campos receptivos en el córtex.

- 6.3.1 Campos receptivos selectivos a frecuencia y orientación.
  - 6.3.2 Recubrimiento de los dominios espacial y frecuencial.
  - 6.3.3 Conclusión: representación wavelet en el córtex.
- 

En este tema se concretan las ideas presentadas en el tema anterior en dos casos particulares: LGN y Córtex.

De la forma de los campos receptivos en el LGN se deduce (aproximadamente) la codificación oponente del color y la sensibilidad global a frecuencias espacio-temporales.

De la forma de los campos receptivos en el Córtex se deduce el tipo de representación utilizada por el sistema visual para el análisis de las texturas.

Primero tratamos el caso del LGN presentando la expresión de los campos receptivos a este nivel: tienen simetría circular centro periferia (gaussianas con signos opuestos) y con una sensibilidad espectral en estas regiones, que puede ser igual (R+G)-(R+G), o diferente R-G e Y-B.

En función de las combinaciones posibles, surge la clasificación en células de tipo I (células R-G con centro y periferia), II (células Y-B sin periferia) o III (células (R+G)-(R+G) con centro y periferia).

Al analizar el comportamiento espectral de estas células se deduce la existencia de respuestas excitatorias e inhibitorias en diferentes regiones del espectro, con presencia de puntos neutros para las longitudes de onda en las que se cancelan las áreas de signo opuesto del campo receptivo pesadas por su contribución espectral.

Esto es consistente con los experimentos de cancelación de tono de Jameson y Hurvich descritos en el tema 7 de *Psicofísica*.

A continuación, se deduce la forma pasa-banda y pasa-baja de las CSFs acromática y cromáticas a partir de la forma de los campos receptivos acromáticos y oponentes.

La CSF del canal Y-B se obtiene directamente de la respuesta impulsional de las células de tipo II. Las CSFs acromática y cromática para el canal R-G se obtienen de combinaciones adecuadas de las respuestas de las células de tipo I. Las células de tipo III (sin oponencia espectral) también dan una forma pasa-banda como la combinación acromática de las células de tipo I.

Como resumen se repasa la forma de las superficies de sensibilidad espacio-temporales acromática y cromáticas presentadas en el tema 9 de *Psicofísica*.

En la práctica 3 los alumnos construirán funciones campo receptivo con oponencia espectral para la reproducción del punto neutro y aplicarán CSFs 2D para comprobar los efectos de la limitación de la anchura de banda frecuencial en las imágenes.

Después se aborda el estudio de los campos receptivos del córtex. En este caso, en vez de simetría centro periferia se tienen funciones periódicas enventanadas (localizadas entorno a una cierta posición espacial). Se demuestra que estas funciones son filtros pasa-banda con la frecuencia y la orientación determinadas por la frecuencia de la función periódica, y la anchura frecuencial y orientación determinadas por la anchura de la ventana espacial.

La anchura de las ventanas espaciales es inversamente proporcional a la frecuencia, con lo que la anchura de banda frecuencial crece con la frecuencia.

Existe un sistema de detectores de este tipo que dividen el dominio frecuencial en 4 ó 5 niveles de resolución con anchuras frecuenciales de una octava, y tienen una sensibilidad a orientaciones de entre 20 y 30 grados.

Estos detectores recubren el dominio espacial con diferente densidad en función de su frecuencia: los de baja frecuencia (con campos receptivos grandes) lo hacen con una densidad baja, mientras que los de alta frecuencia (con campos receptivos pequeños) lo hacen con una densidad mayor.

En principio se han propuesto diferentes funciones para ajustar la forma de estos campos receptivos, pero, para obtener un modelo más claro, se acepta representarlos mediante funciones ortogonales de forma que los productos escalares de las funciones por la entrada son directamente los coeficientes de la representación en dicha base. El resultado es que en el tránsito retina-córtex se produce un cambio de representación de las imágenes desde el dominio espacial a un dominio de funciones wavelet.

Para finalizar el tema se muestra a los alumnos ejemplos de este modelo en funcionamiento utilizando la librería de representación cortical de imágenes de Eero Simoncelli [29]. En la práctica 4 ellos mismos experimentarán con esta herramienta.

---

Bibliografía recomendada:

Landy y Movshon 91 [24], Capítulo 12  
Wandell 95 [2], Capítulos 6 - 9  
Spillmann 90 [6], Capítulos 8, 10 y 11

---

---

Bloque 3: *Modelos fisiológicos y psicofísicos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas*

TEMA 7: NO LINEALIDADES EN EL SISTEMA VISUAL

Tiempo aproximado: 5 horas

---

#### 7.1 Caso acromático. Adaptación y enmascaramiento.

7.1.1 Respuesta sigmoïdal a la salida de los detectores de frecuencia.

7.1.2 Normalización divisiva efecto de los vecinos espaciales, de orientación y escala.

7.1.3 Relación con los umbrales incrementales de contraste.

#### 7.2 Caso cromático: modelos de apariencia del color

7.2.1 Fenómenos básicos de inducción, adaptación cromática y constancia del color.

7.2.2 No linealidades y normalización en los modelos de apariencia del color.

7.2.3 Uso de CIE  $L^*a^*b^*$  para la predicción de fenómenos de apariencia del color.

---

En este tema se describe con más detalle la forma de las no linealidades aplicadas a la salida de los mecanismos lineales.

Se consideran por separado el caso acromático y el cromático. Mientras que en el primer caso los modelos provienen directamente del estudio de la respuesta de las células y posteriormente han sido adoptados para reproducir experiencias psicofísicas, en el segundo caso se plantean modelos que han surgido para explicar la psicofísica.

Tratamos todos estos modelos en el mismo tema para poner de manifiesto la idea básica común a todos ellos: la señal que procede de los mecanismos lineales se modifica en una etapa posterior normalizando las salidas por una señal de referencia procedente del entorno.

En primer lugar recojemos el modelo no-lineal con interacciones presentado en el tema 5. Aquí vemos que el efecto del entorno (espacial frecuencial y en orientación) reduce la respuesta de un determinado detector, con la consiguiente variación de su sensibilidad y umbrales incrementales. Para esto hacemos uso de las relaciones entre estos parámetros presentada en el tema 2 de *Psicofísica*.

A continuación tratamos el caso cromático. Como algunos alumnos pueden no haber cursado la asignatura optativa de *Colorimetría y Visión del Color*

hacemos una breve introducción de los fenómenos relevantes relacionados con el efecto del entorno espacio-temporal en la percepción del color: inducción, adaptación y constancia del color, presentando el concepto de pares correspondientes.

Después, tratamos el modelo de adaptación de Von Kries, poniendo de manifiesto la relación con los modelos de normalización presentados en el caso acromático, y repasamos las características básicas de los modelos de apariencia.

En definitiva, en ambos casos cromático y acromático, el efecto de saturación provocado por la percepción (previa o simultánea) de otros estímulos se modeliza mediante la normalización por el entorno y la aplicación de no linealidades.

Finalmente se describe brevemente el modelo CIE  $L^*a^*b^*$  y se explica su uso para reproducir fenómenos de inducción y cálculo de pares correspondientes.

---

Bibliografía recomendada:

Landy y Movshon 91 [24], Capítulo 9  
Wandell 95 [2], Capítulo 6  
Fairchild 97 [3], Capítulos 6, 8 - 10

---

---

Bloque 4: *Modelos estadísticos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas*

TEMA 8: DESCORRELACIÓN Y CAMPOS RECEPTIVOS

Tiempo aproximado: *6 horas*

---

- 8.1 ¿Porqué la representación de imágenes y colores en el sistema visual es la que es?
- 8.1.1 Imágenes (y colores) naturales.
  - 8.1.2 Correlación entre los coeficientes de las imágenes en el espacio.
  - 8.1.4 Correlación entre las respuestas LMS.
  - 8.1.2 El principio de economía en la representación.
- 8.2 Correlación entre las componentes de una representación.
- 8.2.1 Densidad de probabilidad de imágenes o colores en una representación.
  - 8.2.2 Matriz de covarianza.
  - 8.2.3 Cambio de base para eliminar la correlación.
  - 8.2.4 Componentes principales de una PDF.
- 8.3 Descorrelación de la información espacial: campos receptivos del córtex.
- 8.3.1 Transformación para eliminar la correlación.
  - 8.3.2 Resultados: funciones oscilantes con frecuencia creciente.
- 8.4 Descorrelación de la información cromática: canal acromático y canales oponentes.
- 8.4.1 Transformación para eliminar la correlación.
  - 8.4.2 Resultados: canal acromático y canales oponentes.
- 8.5 Normalización y descorsrelación.
- 8.5.1 Eliminación de la correlación entre escalas.
  - 8.5.2 Descuento del iluminante.
- 

El sistema visual es un sistema de procesado de información, por eso su estructura debe estar relacionada con las propiedades de las señales con las que trabaja y su funcionamiento debe estar regido por unos principios de economía

y optimalidad en el procesado de esta información. En este bloque analizamos el funcionamiento del sistema desde este punto de vista.

En este primer tema presentamos el principio de economía en la representación que rige la organización del sistema visual. En el tema siguiente analizamos cuantitativamente cual es la información a la que es sensible el sistema y cual es la información que rechaza.

Iniciamos el tema haciendo una reflexión sobre la ineficiencia que supondría la codificación de las imágenes naturales en el dominio espacial o la codificación del color de esas imágenes en una base LMS debido a la alta redundancia que existe entre las componentes de la señal en esas representaciones.

Actuando de esa forma estaríamos almacenando multitud de respuestas que podrían deducirse del entorno.

Si la representación es tal que se descorrelacionan las respuestas de los detectores la codificación obtenida es óptima porque se utiliza un sólo detector para cada componente independiente de la señal.

Después de presentar estas ideas intuitivas, introducimos los conceptos necesarios para formalizarlas: funciones densidad de probabilidad y covarianza de los datos.

Nuevamente volvemos a utilizar la herramienta de la diagonalización (empleada en el tema 4 para el análisis de sistemas lineales) en este caso para obtener la representación óptima que elimina la correlación entre los datos.

Las componentes más importantes son aquellas con más varianza porque (como veremos en el tema siguiente) son las que aportan más información sobre la señal.

A continuación vemos que aplicando estas ideas sobre las imágenes y colores naturales se obtienen de forma directa las características básicas de los campos receptivos corticales y de los canales cromáticos oponentes, así como la importancia relativa de los mismos.

En la práctica 5 los estudiantes obtienen estos resultados a partir de un conjunto de imágenes naturales en color.

Por último, se reflexiona sobre los efectos descorrelacionadores adicionales que implica la normalización tanto en los modelos de percepción de contraste como en los modelos de apariencia del color.

---

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulos 8 y 9

---

---

Bloque 4:	<i>Modelos estadísticos de percepción de texturas espacio-temporales y cromáticas</i>
TEMA 9:	INFORMACIÓN ACEPTADA Y RECHAZADA POR EL SISTEMA VISUAL
Tiempo aproximado:	5 horas

---

### 9.1 ¿Cuanta información contiene una imagen?

#### 9.2 Anchura de banda y extensión espacial.

9.2.1 Número de datos independientes en una imagen: extensión espacial y anchura de banda.

9.2.2 Muestreo. El teorema de muestreo mediante ejemplos.

9.2.3 Limitación de información representada por las CSFs

#### 9.3 Entropía.

9.3.1 Incertidumbre e información.

9.3.2 Cuantización y entropía. Ejemplos.

9.3.3 Limitación de la información representada por los umbrales incrementales de contraste.

#### 9.4 Información perceptualmente relevante y diferencia entre imágenes.

---

En este tema se trata de cuantificar como procesamos la información visual. En concreto veremos como los modelos de percepción descritos en los temas anteriores implican una eliminación de información en los estímulos a los que nos enfrentamos.

Como resultado de estos procesos de eliminación de información, no toda la información presente en las imágenes es perceptualmente relevante, lo cual está relacionado con las medidas de distancia perceptual entre imágenes.

El tema se inicia con unos ejemplos (imágenes naturales y sintéticas) para que el alumno se de cuenta de que no es trivial dar una medida de la información contenida en una imagen.

Seguidamente, se presentan los conceptos de *información de Gabor* relacionada con la anchura de banda de la señal y el muestreo, e *información de Shannon*, relacionada con la incertidumbre o aleatoriedad de la señal y la cuantización.

En primer lugar, se muestra que el número de datos independientes necesarios para describir una imagen es proporcional al producto de las anchuras

espaciales y frecuenciales de la imagen: es la llamada información de Gabor. Este hecho se ilustra resultados de muestreo. El muestreo implica una disminución del número de datos, luego intuitivamente, debe existir un límite al número de datos que podemos descartar de una señal. A través de ejemplos, se presenta como el muestreo espacial implica una replicación del espectro dependiente de la frecuencia de muestreo. El teorema de muestreo (que se enuncia sin demostración) formaliza la intuición adquirida mediante los ejemplos. La conclusión es que, efectivamente, el número de datos independientes es proporcional a la anchura espacial y a la anchura frecuencial porque si la anchura frecuencial es limitada siempre podemos muestrear e interpolar sin error. Después de la presentación de estos resultados, las CSFs se interpretan como unos limitadores de banda que eliminan información de Gabor.

En segundo lugar abordamos las medidas de información relacionadas con la entropía. Para ello se presenta la idea intuitiva de que una señal aporta más información cuanto mayor es la incertidumbre asociada al suceso que describe la señal. Dicha incertidumbre depende de la forma de la función densidad de probabilidad y del número de valores diferentes que puede tomar la señal. Se describe brevemente lo que significa cuantizar una variable (reducir el número de valores diferentes que puede tomar), de modo que las medidas de información basadas en la incertidumbre deben depender de la PDF y de la cuantización realizada. Se enuncia el concepto de entropía, ilustrando su significado mediante ejemplos de imágenes con diferente estructura espacial sometidas a diferente grados de cuantización (en el dominio espacial). Se resalta el hecho de que a mayor varianza mayor incertidumbre (mayor información), de ahí la importancia asociada a los valores propios de la covarianza en el tema anterior. Este apartado acaba describiendo los umbrales incrementales de contraste como una codificación cuantizada de los coeficientes de la representación, de modo que dichos umbrales implican una reducción selectiva de información.

Para finalizar el tema, planteamos que existe una relación entre los dos mecanismos de eliminación de información descritos arriba y la medida de distancias entre imágenes. Es evidente que no todas las distorsiones sobre una imagen serán igualmente perceptibles en función de que dichas distorsiones afecten o no a la información perceptualmente relevante (no descartada por el sistema visual).

---

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulo 8  
Watson 93 [21], Capítulos 9, 10 y 14

---

---

Bloque 5:	<i>Modelos de percepción de movimiento de bajo nivel</i>
TEMA 10:	FLUJO ÓPTICO A PARTIR DE LA RESPUESTA DE LOS FILTROS CORTICALES
Tiempo aproximado:	<i>4 horas</i>

---

- 10.1 Flujo óptico en el dominio espacial y en el dominio frecuencial.
  - 10.2 Detectores de velocidad definidos en el dominio espacial. Unidades de Reichardt.
    - 10.2.1 Estructura de las unidades de Reichardt.
    - 10.2.2 Máximo desplazamiento perceptible y longitudes de interacción.
  - 10.3 Cálculo de velocidades a partir de la respuesta de filtros 3D en el MT.
    - 10.3.1 Sistema de filtros en el dominio de Fourier 3D
    - 10.3.2 Velocidades y patrones de respuesta de los filtros.
    - 10.3.3 Interpretación de los resultados de detección de movimiento coherente en función del modelo.
- 

En este tema se presentan los modelos que se han propuesto para explicar la estimación de flujo óptico en el sistema visual a partir de los filtros localizados en el espacio y la frecuencia espacio-temporal descritos en los temas anteriores y en *Psicofísica*.

El tema se inicia recordando el concepto de flujo óptico y sus ecuaciones en el dominio espacial y el frecuencial. Mientras que en *Psicofísica* se enunció la localización de velocidades en el dominio frecuencial haciendo uso de las propiedades de las sinusoides espacio-temporales, en este caso se deduce la ecuación en el dominio frecuencial de forma más general, haciendo uso de las propiedades de la transformada de Fourier bajo transformaciones del dominio.

El primer modelo considerado es el de Reichardt. Una unidad de Reichardt está formada por dos detectores espaciales separados una cierta distancia, y cuyas respuestas se someten a retrasos temporales fijos.

Se demuestra que el producto de las respuestas desfasadas resulta máximo cuando la velocidad de un objeto coincide con la relación entre la distancia y el retraso fijos de esta unidad de proceso. Un sistema de estas unidades podría utilizarse para calcular el flujo en cada punto del campo visual.

Los datos de máximos desplazamientos perceptibles indicarían la longitud máxima de correlación entre detectores espaciales así como su distribución en

la retina (ya que los datos de desplazamientos máximos varían con la excentricidad).

En segundo lugar se tratan los modelos frecuenciales basados en las consideraciones de Watson y Ahumada sobre el comportamiento de secuencias en movimiento en el dominio de frecuencias espacio-temporales.

Estos modelos se fundamentan en la existencia de un sistema de detectores cuyos campos receptivos recubren el dominio frecuencial 3D tal como vimos en el tema 6.

Los estímulos con diferentes movimientos provocan diferentes patrones de respuestas en este sistema de detectores debido a la orientación de la energía de la transformada en el dominio frecuencial. Registrando los patrones de respuesta puede deducirse cual es la velocidad más probable del estímulo.

Este modelo explica de forma muy sencilla los resultados sobre umbrales de percepción de coherencia en el movimiento (que los alumnos tuvieron ocasión de medir en la práctica 5 de *Psicofísica*). Mientras que un movimiento aleatorio provoca un patrón de respuestas plano, la superposición de un movimiento coherente da lugar a una cierta energía en un plano definido del dominio de Fourier 3D. Cuando dicha señal superpuesta es suficientemente grande respecto del ruido uniforme, el sistema es capaz de identificar la presencia del movimiento coherente.

---

Bibliografía recomendada:

Wandell 95 [2], Capítulo 10

---

### 5.3.4 Desarrollo de los contenidos (laboratorio)

---

PRÁCTICA 1: IMÁGENES COMO MATRICES Y VECTORES

Tiempo aproximado: 3 horas

---

#### Objetivo

Los objetivos de la práctica incluyen: (1) que el alumno se familiarice con la representación discreta de imágenes, tanto en forma de matriz como en forma de vector, (2) que defina dominios discretos y funciones en dichos dominios, y (3) que practique con operaciones básicas: suma, resta, producto escalar y cambio de base.

#### Descripción

Se muestra a los alumnos las funciones adecuadas para leer y guardar imágenes en MATLAB, representarlas gráficamente, submuestrearlas y reordenarlas como vectores.

Se recuerdan los conocimientos adquiridos en *Matemáticas* para definir dominios discretos 2D y como utilizar estos dominios para definir imágenes sencillas.

Se presenta la base de funciones DCT (para imágenes de dimensionalidad baja  $8 \times 8$  ó  $16 \times 16$ ), se comprueba su ortogonalidad y se construye la matriz de cambio de base al dominio DCT.

Se comprueba usando imágenes sencillas (sinusoides) como el producto escalar es una medida de similitud entre imágenes.

#### Material

- Ordenador con MATLAB y funciones específicas para la reordenación de imágenes como vectores.

#### Conexión con los temas de teoría

Esta práctica ilustra lo expuesto en los temas 2 y 3 sobre representación de funciones sobre una base de vectores ortogonales y el significado de los coeficientes de la imagen en dicha base.

Por otro lado, las técnicas empleadas aquí son necesarias para implementar las ideas propuestas en el tema 8 tal como se hace en la práctica 5.

PRÁCTICA 2: ANÁLISIS DE FOURIER 2D Y 3D

Tiempo aproximado: 3 horas

---

**Objetivo**

Repasar (algunas) propiedades de la transformada de Fourier 2D de señales reales y el significado del dominio de Fourier mediante ejemplos.

Comprobar que una secuencia con movimiento uniforme da lugar a un plano de energía inclinado en el dominio de Fourier.

**Descripción**

Se muestra a los alumnos las funciones adecuadas para realizar transformadas de Fourier 2D y convoluciones 2D.

Se enuncia el significado del dominio de Fourier discreto y se comprueba mediante el cálculo de transformadas de Fourier de sinusoides y funciones de Gabor de distinta frecuencia y orientación. Se revisan las propiedades de simetría de la transformada de imágenes reales y las propiedades de la transformada ante transformaciones afines del dominio (giros y escalados) teniéndose como consecuencia el principio de incertidumbre.

Se comprueba que la convolución de funciones produce el mismo efecto que el producto de sus espectros.

Se muestra a los alumnos las funciones para generar y representar secuencias y calcular y representar transformadas de Fourier 3D.

Usando secuencias (precalculadas) de puntos aleatorios y sinusoides en movimiento se comprueba la inclinación del espectro 3D en función de la velocidad.

**Material**

- Ordenador con MATLAB y funciones específicas para tratamiento de secuencias.

**Conexión con los temas de teoría**

Los ejercicios propuestos en esta práctica ilustran las propiedades de la transformada de Fourier y la actuación de sistemas lineales invariantes a desplazamientos enunciados en el tema 4.

Así mismo, la aplicación de filtros en el dominio de frecuencias sirve para interpretar la actuación de las CSFs presentadas en el tema 6 (analizadas en la práctica 3). Además las propiedades de la TF bajo giros y escalados sirven para interpretar la forma y actuación de los campos receptivos corticales presentados en el tema 6 (y analizados en la práctica 4).

---

PRÁCTICA 3: CAMPOS RECEPTIVOS EN EL LGN Y CSFs

Tiempo aproximado: 3 horas

---

### Objetivo

En esta práctica se buscan dos objetivos: (1) Analizar la dependencia del punto neutro de un detector lineal en función de los parámetros espaciales de su función campo receptivo. (2) Analizar el efecto de aplicar CSFs acromáticas y cromáticas a una imagen cualquiera.

### Descripción

Las CSFs acromática y cromáticas pueden explicarse mediante la combinación de las respuestas lineales de los diferentes tipos de células centro-periferia presentes en el LGN.

La práctica tiene dos partes. En la primera se utiliza una función que genera un campo receptivo centro-periferia con oponencia espectral R-G como las células de tipo I del LGN, pudiéndose variar las sensibilidades espectrales y las anchuras relativas del centro y la periferia.

Los estudiantes calculan la sensibilidad espectral de la célula presentándole estímulos monocromáticos uniformes espacialmente y obteniendo la respuesta resultante.

En la segunda parte, se aplican filtros 2D sobre las componentes acromática y cromáticas de una imagen en color.

Los estudiantes hacen dos tipos de experiencia: (1) aplican filtros pasa-baja ideales y experimentan los efectos de las frecuencias de corte. (2) aplican los filtros obtenidos con sus datos de CSFs acromáticas y cromáticas medidos en *Psicofísica*.

### Material

- Ordenador con MATLAB y COLORLAB más las funciones específicas de campos receptivos centro-periferia con oponencia espectral.

### Conexión con los temas de teoría

Los ejercicios tratados aquí ilustran los conceptos sobre CSFs y LGN presentados en el tema 6.

Además revelan la degradación de la señal debido a la limitación de su anchura de banda, concepto que se trata en el tema 9.

PRÁCTICA 4: REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN EL CÓRTEX

Tiempo aproximado: 3 horas

---

### Objetivo

El objetivo es que el alumno explore las propiedades básicas de las funciones campo receptivo en el córtex, y presentar una herramienta para calcular fácilmente la representación cortical.

### Descripción

En primer lugar los alumnos generan filtros de Gabor de varias frecuencias y orientaciones, calculan su transformada de Fourier (comprobando la relación entre anchura espacial y anchura frecuencial). Después los aplican sobre una imagen natural, viendo como cada canal responde a unas determinadas características de la imagen.

Hecho esto, se presenta una herramienta para el cálculo cómodo de la transformada wavelet que aplica automáticamente los filtros y submuestra las respuestas de forma aproximada a como ocurre en el córtex.

Se analiza la transformada wavelet de texturas e imágenes naturales ejemplo para ver como quedan representadas las diferentes orientaciones y escalas a nivel cortical.

Así mismo, puede simularse el efecto de lesiones corticales (anulando la salida de ciertos detectores) o la existencia de resolución limitada en los canales de contraste (redondeando las respuestas tras la aplicación de no linealidades con saturación tipo raíz cuadrada).

### Material

- Ordenador con MATLAB y la librería de representación cortical de imágenes de Eero Simoncelli.

### Conexión con los temas de teoría

El estudio de la representación de imágenes mediante filtros de Gabor y transformada wavelet ilustra las ideas presentadas en el tema 6. La aplicación de no-linealidades y la resolución limitada en la discriminación de contraste en estos canales ilustra la primera parte del tema 7.

---

PRÁCTICA 5:                   DESCORRELACIÓN Y CAMPOS RECEPTIVOS

Tiempo aproximado:    3 horas

---

### Objetivo

Comprobar como se obtienen campos receptivos oscilantes y canales oponentes aplicando el principio de organización de los detectores para la eliminación de redundancia.

### Descripción

Los alumnos parten de un conjunto de imágenes naturales en color, y en primer lugar comprueban el alto grado de correlación existente tanto en la representación de la información acromática en el dominio espacial como en la representación de los colores en la base LMS.

Esto se hace tanto a través del cálculo de la matriz de covarianza, como, más intuitivamente, observando la alineación de la nube de puntos (colores o imágenes) en los espacios de representación correspondientes.

Aplicando a estas matrices de covarianza la rutina de MATLAB para el cálculo de valores y vectores propios, obtenemos los campos receptivos y el cambio de representación cromática necesarios para eliminar la correlación entre las muestras en la nueva representación.

Los estudiantes representan los campos receptivos ordenados en función de su valor propio, y calculan las funciones de igualación del color en la nueva representación cromática para identificar la oponencia espectral.

### Material

- Ordenador con MATLAB y COLORLAB.

### Conexión con los temas de teoría

Aplicando la notación propuesta en los temas 2 y 3 (y utilizada en la práctica 1), en esta práctica se implementan explícitamente las ideas presentadas en el tema 8.



# Bibliografía

- [1] J.M. Artigas et al. *Óptica Fisiológica, Psicofísica de la Visión*. McGraw Hill, New York, 1995.
- [2] B.A. Wandell. *Foundations of Vision*. Sinauer Assoc. Publish., Massachusetts, 1995.
- [3] M.D. Fairchild. *Color Appearance Models*. Addison-Wesley, New York, 1997.
- [4] P. Capilla et al. *Fundamentos de Colorimetría*. Educació, Materials. Universitat de València, Valencia, 2002.
- [5] S.H. Schwartz. *Visual Perception: A Clinical Orientation*. MacGraw Hill, New York, 1999.
- [6] L. Spillmann and J.S. Werner. *Visual Perception: The Neurophysiological Foundations*. Academic Press, San Diego, CA, 1990.
- [7] K.R. Boff, L. Kaufman, and J.P. Thomas. *Handbook of Perception and Human Performance*. John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [8] D. Marr. *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W.H. Freeman and Co., New York, 1980.
- [9] S. Coren, L.M. Ward, and J.T. Enns. *Sensación y Percepción*. McGraw Hill, México, 1999.
- [10] J. Romero, J.A. García, and A. García. *Curso Introductorio a la Óptica Fisiológica*. Ed. Comares, Granada, 1996.
- [11] J.M. Artigas et al. *Tecnología del Color*. Educació, Materials. Universitat de València, Valencia, 2002.
- [12] G. Wyszecki and W.S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [13] R.M. Boynton. *Human Color Vision*. OSA Press, La Jolla, CA, 1992.

- [14] R.D. Lozano. *El Color y su Medición*. Editorial Americalee, Buenos Aires, 1978.
- [15] J. Malo and M.J. Luque. *COLORLAB: A Color Processing Toolbox for MATLAB*. Disponible en <http://taz.uv.es/~jmallo>, Universitat de València, 2002.
- [16] A. Escalera. *Visión por Computador: Fundamentos y Métodos*. Prentice Hall, Madrid, 2001.
- [17] W.K. Pratt. *Digital Image Processing*. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [18] R.C. Gonzalez and P. Wintz. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishers, Reading, Massachusetts, 1987.
- [19] C.M. Thomson and L. Shure. *MATLAB Image Processing Toolbox*. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, 1993.
- [20] R.L. DeValois and K.K. DeValois. *Spatial Vision*. Oxford University Press, Oxford, 1990.
- [21] A.B. Watson. *Digital Images and Human Vision*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [22] R.W.G. Hunt. *The Reproduction of Colour*. Fountain Press, London, 1995.
- [23] H.R. Kang. *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1997.
- [24] M.S. Landy and J.A. Movshon. *Computational Models of Visual Processing*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [25] G. Strang. *Introduction to Linear Algebra*. Wellesey-Cambridge Press, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- [26] R.O. Duda and P.E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1973.
- [27] L. Anshel and D. Goldfeld. *Calculus: a Computer Algebra Approach*. International Press, New York, 1997.
- [28] MathWorks. *Using MATLAB*. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, 1996.
- [29] E.P. Simoncelli. *MatlabPyrTools: MATLAB code for multi-scale cortical image representations*. Disponible en <http://www.cns.nyu.edu/~lcv>, New York University, 1997.

## Capítulo 6

# Fuentes Bibliográficas

En este capítulo comento brevemente la bibliografía recomendada tanto para los alumnos como la que contiene material útil para el profesor en su tarea de preparación de las asignaturas.

He organizado los libros en dos secciones: *manuales básicos* y *manuales complementarios o de uso puntual*. Una cierta referencia ha sido calificada como básica bien por el número de temas de los programas que se cubren en ella o (no siempre en consonancia con lo anterior) por su adecuación específica de los contenidos a una cierta parte del programa, como por ejemplo, las referencias especializadas en visión de color o en aspectos espacio-temporales.

Como se ha visto en el desarrollo de los programas en el capítulo anterior, he decidido no incluir referencias procedentes de artículos de investigación porque considero que quizá resulten un poco superfluas para los alumnos de primer ciclo.

Además de estas referencias *en papel*, incluyo algunos comentarios sobre direcciones de *Internet* que pueden resultar interesantes para encontrar información adicional y ejemplos visuales que pueden resultar muy adecuados en este tipo de asignaturas.

### 6.1 Manuales básicos

*Wandell 95*

B.A. Wandell. *Foundations of Vision*. Sinauer Associates Publishers. Sunderland, Massachusetts. 1995.

El libro del Prof. Brian Wandell de la Univ. de Stanford es un texto excelente que abarca todos los aspectos de la 'Percepción Visual' tal y como se abordan en las asignaturas presentadas: desde la fenomenología fisiológica y psicofísica hasta los modelos, tanto los puramente fisiológicos como las interpretaciones basadas en el procesado eficiente de las imágenes naturales. Y esto tanto en los aspectos cromáticos como en los de percepción de patrones espaciales y de movimiento.

El conjunto de aspectos recogidos en las asignaturas presentadas y su tratamiento ha estado en gran medida inspirado en este volumen.

Resulta particularmente interesante porque expone de forma sencilla conceptos como la expresión matricial de la integral de superposición (facilitando la comprensión de la actuación de un sistema de células) o la redundancia en las imágenes naturales y su efecto sobre los campos receptivos.

A pesar de estar dirigido a estudiantes de psicología, el libro asume que los alumnos tiene un cierto conocimiento de álgebra y espacios vectoriales y manejan el ordenador. Dos ejemplos: (1) habla de descorrelación en el sistema visual, pero no explica explícitamente como se calcula la matriz de covarianza y sus funciones propias. (2) Después de hablar cualitativamente sobre la representación de imágenes en bases ortogonales, en las cuestiones propuestas al final del capítulo 8 introduce la base DCT y pretende que el alumno haga cálculos *usando una aplicación informática adecuada*.

Considero que el planteamiento general del libro resulta muy interesante por su intención de llegar a plantear el uso de modelos cuantitativos en la parte espacio-temporal, pero creo que para llevarlo a la práctica, en nuestro caso tenemos que dedicar cierto tiempo para capacitar a los estudiantes en el uso de las cuestiones que no se detallan en este libro.

Para subsanar esta laguna del libro de Wandell se han incluido referencias *de uso puntual* sobre matemáticas para utilizarlas en el tema 7 de *Psicofísica* y en los primeros temas de *Percepción* y sus sesiones prácticas.

#### *Artigas 95*

J.M. Artigas et al. *Óptica Fisiológica, Psicofísica de la Visión*. MacGraw Hill. Madrid. 1995.

Este libro es un extenso texto en castellano que recoge la mayor parte de la fenomenología tratada en *Psicofísica de la visión* además de un apéndice sobre métodos psicofísicos de medida, con lo cual se hace un gran uso de esta referencia en la citada asignatura.

Destaca su estudio detallado de la CSF, pero no se profundiza en la organización subbanda de los detectores espaciales ni en los fenómenos de apariencia del color.

#### *Fairchild 97*

M.D. Fairchild. *Color Appearance Models*. Addison-Wesley. New York. 1997.

El tratamiento de la percepción del color planteado en este Proyecto Docente está muy influido por el texto de Fairchild, tanto en lo que se refiere a su interés fundamental por los fenómenos de apariencia (en contraposición

a textos de corte más fisiológico como el de Boynton), como en lo relacionado a su interés por plantear modelos cuantitativos de esa apariencia más allá de la colorimetría triestímulo.

El planteamiento general de la descripción de la apariencia de los estímulos y sus dimensiones perceptuales lo hacen adecuado para ofrecer una visión conjunta de la percepción de la energía (*luminosidad y claridad*), y el *color*.

Debido a su interés en los modelos de apariencia, el texto de Fairchild trata demasiado superficialmente la colorimetría triestímulo. Por otro lado, la exposición analítica de los modelos dice poco de su funcionamiento, con lo cual para sacar rendimiento a este libro es conveniente poder experimentar numéricamente con los modelos.

#### *Capilla 02*

P. Capilla et al. *Fundamentos de Colorimetría*. Universitat de València, Educació: Materials. Valencia. 2002.

La idea del texto coordinado por P. Capilla, J.M. Artigas y J. Pujol, es combinar la formulación clásica de la colorimetría triestímulo tal como se expone en el Wyszecki-Stiles 82 (véase más abajo) o en el texto de Artigas y colaboradores 95 (arriba), con las ideas de apariencia expresadas por Fairchild (arriba). De esta forma se obtiene un texto unificado que cubre todos los aspectos de la percepción del color tratados en las tres asignaturas de este Proyecto Docente. Resulta muy conveniente para los alumnos porque en clase usamos la notación que hemos empleado en este texto.

Igual que en el caso anterior, este libro necesita un complemento cuantitativo para que los alumnos puedan utilizar las teorías presentadas en la solución de problemas prácticos.

#### *Artigas 02*

J.M. Artigas et al. *Tecnología del Color*. Universitat de València, Educació: Materials. Valencia. 2002.

Este es un texto de carácter aplicado que resulta complementario del texto básico descrito arriba (P. Capilla et al. 02), y que por tanto resulta muy conveniente para la parte de tecnología del color de la asignatura *Colorimetría*.

#### *Malo 02*

J. Malo and M.J. Luque. *COLORLAB: A Color Processing Toolbox for MATLAB 5.x*. Disponible en <http://taz.uv.es/~jmalo>. Universitat de València. 2002.

Esta *Guía del Usuario de COLORLAB* es el complemento cuantitativo ideal para los textos de Fairchild 97, Capilla et al. 02 y Artigas et al. 02. Como suele ser normal en los textos de apoyo de las librerías de MATLAB, aquí se repasan los conceptos básicos de la materia mientras se describe el uso de las funciones del programa, de forma que resulta un recurso muy apropiado para un aprendizaje interactivo.

Por ello se recomienda este texto tanto para las sesiones prácticas de *Colorimetría* como para apoyo a la comprensión de la teoría en *Psicofísica* y *Colorimetría*.

#### *Wyszecki 82*

G. Wyszecki and W.S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. John Wiley & Sons. New York. 1982.

Debido a su extensión este es el texto más clásico en colorimetría básica, pero su notación y su organización poco didáctica hacen que no sea apropiado para su uso directo por los estudiantes, quedando como recurso de apoyo para el profesor.

#### *Schwartz 99*

S.H. Schwartz. *Visual Perception: A Clinical Orientation*. MacGraw Hill. New York. 1999.

Este texto de carácter generalista recoge los aspectos cromáticos y espacio-temporales de la Percepción Visual, pero debido al tratamiento especializado de los aspectos cromáticos en los textos citados arriba, sólo recomiendo este texto por su excelente descripción de las técnicas psicofísicas, y su sencillo tratamiento de la percepción de redes y fenómenos de movimiento. También resulta interesante por la colección de cuestiones (cualitativas) que plantea (y resuelve) al final de cada tema.

Cuenta con una primera introducción útil al análisis de Fourier, pero debido a su brevedad no llega a proporcionar todas las herramientas necesarias para comprender por ejemplo la organización de los campos receptivos corticales.

#### *Spillmann 90*

L. Spillmann and J.S. Werner. *Visual Perception: The Neurophysiological Foundations*. Academic Press. San Diego, CA. 1990.

Se trata de una colección de capítulos de diferentes autores que tratan monográficamente distintos temas relacionados con el sustrato fisiológico de la Percepción Visual. Resultan especialmente interesantes los capítulos dedicados a la organización de los detectores de frecuencia y orientación y a la percepción de movimiento, apropiados para su uso en las secciones dedicadas a la percepción de textura y movimiento en *Psicofísica* y *Percepción*.

*Landy 91*

M.S. Landy and J.A. Movshon. *Computational Models of Visual Processing*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 1991.

Este texto, como el anterior, también es una compilación de capítulos de diferentes autores, con un uso especialmente adecuado para la descripción de los modelos de funcionamiento de los detectores de patrones espaciales.

Como en el caso de Wandell 95 y Spillmann 90 en ocasiones no resulta autocontenido y requiere un complemento cuantitativo que debe proporcionarse al estudiante por otros medios.

*Boff 86*

K.R. Boff et al. *Handbook of Perception and Human Performance*. John Wiley & Sons. New York. 1986.

Este es un extensísimo y exhaustivo volumen que recoge datos y modelos empíricos del comportamiento del sistema visual al nivel de resolución de las asignaturas de este Proyecto Docente.

No se trata de un libro de texto, sino de una especie de manual de consulta sobre aspectos concretos. Por lo tanto, no es adecuado para ser recomendado genéricamente a los estudiantes, no obstante, lo he incluido aquí porque en ciertos capítulos (que pueden pasarse fotocopiados a los estudiantes), se da una buena explicación de los procesos de sumación de respuestas (útil en varios temas de *Psicofísica*), y se exponen experimentos que revelan las limitaciones del concepto de luminancia (cosa que también se trata experimentalmente en el laboratorio de esa asignatura).

## 6.2 Manuales complementarios o de uso puntual

### 6.2.1 Métodos psicofísicos

*Coren 99*

S. Coren and L.M. Ward and J.T. Enns. *Sensación y Percepción*. McGraw Hill. México. 1999.

Este libro, en general de carácter muy cualitativo y que incluye aspectos de otras modalidades sensoriales (audición, tacto, etc.), resulta útil en los primeros temas de *Psicofísica* por su descripción sencilla y directa de las técnicas de medida en los experimentos perceptuales.

*Romero 96*

J. Romero, J.A. García y A. García. *Curso introductorio a la óptica fisiológica*. Comares. Granada. 1996.

Este libro realizado por los profesores de la Diplomatura de Óptica de la Universidad de Granada es un buen compendio de la Óptica Fisiológica y la Visión Binocular y por lo tanto no cubre con detalle los contenidos abordados en 'Percepción Visual', no obstante tiene una sección de métodos psicofísicos que puede ser de utilidad en los primeros temas de la asignatura *Psicofísica de la Visión*.

### 6.2.2 Color

#### *Boynton 92*

R.M. Boynton. *Human Color Vision*. OSA Press. La Jolla, CA. 1992.

El tratamiento de la teoría de los canales oponentes en el libro de Boynton es excelente, y además cuenta con un capítulo sobre discriminación cromática que aporta gran cantidad de datos y figuras. También tiene un capítulo sobre fenómenos de apariencia del color que complementa la descripción del Fairchild 97.

#### *Byrne 97*

A. Byrne and D.R. Hilbert. *Readings on Color, vol. 2: The Science of Color*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 1997.

Este libro es un compendio de artículos clásicos sobre experimentos y teorías de visión de color que puede constituir una lectura complementaria interesante tanto para profesores como para estudiantes. Resultan particularmente interesantes los capítulos dedicados a la codificación oponente y a la constancia del color.

#### *Hunt 95*

R.W.G. Hunt. *The Reproduction of Colour*. Fountain Press. London. 1995.

Ciertos capítulos de este texto, que cubre exhaustivamente la tecnología de la reproducción del color, resultan de interés en los temas de monitores y cámaras fotográficas de la asignatura *Colorimetría*.

Cuenta además con un apéndice sobre el modelo de Hunt (el autor) de apariencia del color que puede complementar los comentarios sobre este tipo de modelos que se hacen en los textos de Fairchild 97 y Capilla et al. 02.

#### *Kang 97*

H.R. Kang. *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE Optical Engineering Press. Bellingham, Washington. 1997.

Al igual que el texto de Hunt, el libro de Kang, de carácter aplicado, puede utilizarse puntualmente como complemento en los temas de tecnología del color.

*Lozano 78*

R.D. Lozano. *El Color y su Medición*. Editorial Americalee. Buenos Aires. 1978.

Este texto, debido al tiempo transcurrido desde su publicación ha quedado un poco anticuado, no obstante, se trata de un texto en castellano que presenta de forma adecuada la fenomenología básica de las experiencias de igualación del color y puede usarse como texto complementario en los temas relacionados con colorimetría triestímulo.

### 6.2.3 Aspectos espacio-temporales

*DeValois 90*

R.L. DeValois and K.K. DeValois. *Spatial Vision*. Oxford University Press. Oxford. 1990.

El texto de DeValois y DeValois es útil en la descripción de la CSF y los parámetros de que depende y para ilustrar la medida experimental de la estructura de los detectores de frecuencia y orientación así como de sus no-linealidades.

Por lo tanto resulta apropiado como complemento de los temas de percepción de textura en la asignatura de *Psicofísica de la Visión*.

*Watson 93*

A.B. Watson. *Digital Images and Human Vision*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 1993.

El libro de Watson es un compendio de capítulos que tratan de la aplicación de modelos de percepción en diferentes ámbitos del procesamiento de imágenes. En particular resulta útil para ejemplificar el proceso de suma sobre las respuestas de diferentes detectores en tareas de percepción de distorsiones (en *Psicofísica*), y para revelar los efectos de la resolución limitada de los detectores en el tipo (y cantidad) de información rechazada por el sistema visual (*Percepción*).

### 6.2.4 Matemáticas

**Sobre álgebra para sistemas lineales***Anshel 97*

L. Anshel and D. Goldfeld. *Calculus: a Computer Algebra Approach*. International Press. New York. 1997.

Este texto, utilizado por los estudiantes en la asignatura de primer curso *Matemáticas* se utiliza al principio de la asignatura *Percepción* para re-

refrescar los conceptos relativos a la representación de funciones en espacios vectoriales.

*Strang 98*

G. Strang. *Introduction to Linear Algebra*. Wellesey-Cambridge Press. Cambridge, Massachusetts. 1998.

El texto de Strang, también utilizado en la asignatura de primer curso *Matemáticas* resulta particularmente interesante para la aplicación de las ideas de representación lineal al caso de imágenes porque está pensado explícitamente para su uso con MATLAB.

De esta forma los alumnos pueden ir repasando los conceptos ayudándose del ordenador, sin necesidad de hacer tediosas operaciones algebraicas.

*MathWorks 96*

MathWorks. *Using MATLAB*. The MathWorks Inc. Natick, Massachusetts. 1996.

Incluyo el manual de uso de MATLAB, en particular la parte relativa al cálculo con matrices porque en ella se describe de manera sencilla y directa las operaciones básicas que se necesitan para simular y analizar el comportamiento de un sistema de detectores lineales (aplicación de matrices sobre vectores, e inversión y diagonalización de matrices).

*Pratt 91*

W.K. Pratt. *Digital Image Processing*. John Wiley & Sons. New York. 1991.

Además de revisar brevemente el algebra de vectores y transformaciones lineales, el capítulo 7 del texto de Pratt resulta interesante porque muestra ejemplos de la caracterización de sistemas lineales en la formulación matricial usada en Wandell 95 (sin el suficiente detalle), y que resulta tan útil en los temas iniciales de *Percepción* tanto para representar la actuación de un sistema lineal en el dominio espacial, como para entender el cambio de representación necesario para expresar de forma cómoda (como un filtro) la actuación del sistema.

**Sobre transformadas de Fourier 2D**

*Escalera 01*

A. Escalera. *Visión por Computador: Fundamentos y Métodos*. Prentice Hall. Madrid. 2001.

Los textos de procesado de imágenes (tanto este texto en castellano como el siguiente, Gonzalez 87), suelen ser preferibles a otros textos clásicos donde

se expone con gran detalle analítico la transformada de Fourier porque cuentan con ejemplos gráficos de las propiedades de la transformada 2D. Y es este tipo de intuición gráfica lo que se pretende desarrollar en el tema 8 de *Psicofísica* y revisar en el tema 4 de *Percepción*.

#### *Gonzalez 87*

R.C. Gonzalez and P. Wintz. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishers. Reading, Massachusetts. 1987.

Texto clásico de procesamiento de imágenes cuyo capítulo 3 resulta útil para una revisión gráfica de las propiedades del espectro de una imagen.

#### *Thomson 93*

C.M. Thomson and L. Shure. *MATLAB Image Processing Toolbox*. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts. 1993.

El manual de la librería de imágenes de MATLAB describe de forma sencilla como calcular y representar transformadas de Fourier, y quizá sea la forma más atractiva para el estudiante de familiarizarse con las propiedades (y el uso!) de esta herramienta. Se utilizará fundamentalmente en las sesiones prácticas de *Percepción*.

### 6.2.5 Generalidades

De los textos que listo a continuación tan solo se usa su capítulo inicial, donde se ilustra una cierta filosofía para abordar los problemas que será comentada en los capítulos iniciales de *Psicofísica* y *Percepción*.

#### *Marr 78*

D. Marr. *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W.H. Freeman and Co. New York. 1978.

En el primer capítulo del texto de Marr, que revolucionó tanto el ámbito de la visión artificial como la forma en que se analizaban los problemas de la visión humana se ponen de manifiesto los tres niveles de resolución básicos en los que pueden analizarse los problemas de visión: el nivel computacional, el nivel algorítmico y el nivel de implementación física.

#### *Duda 73*

R.O. Duda and P.E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley & Sons. New York. 1973.

El primer capítulo de este texto clásico describe de manera muy sencilla un ejemplo concreto donde se ponen de manifiesto los elementos que constituyen un sistema de visión desde el punto de vista de la función (de

reconocimiento) que debe resolver: sensores, extracción de características y clasificador.

## 6.3 Internet

El alumno puede encontrar material de apoyo útil en Internet para las diversas asignaturas que constituyen el presente Proyecto Docente. La dificultad principal con estas fuentes es separar aquellas con un contenido científico riguroso de las páginas de simple divulgación científica y de las páginas personales de sujetos interesados en la visión, pero sin formación científica.

En la relación que incluimos a continuación, se encuentran exclusivamente páginas red vinculadas a (o avaladas por) investigadores de prestigio en el campo de la visión, instituciones de enseñanza superior y laboratorios de investigación sobre visión.

El alumno debería ser consciente de la necesidad de realizar búsquedas bibliográficas para complementar su formación en áreas específicas, para ampliar sus conocimientos en temas de su interés o para intentar resolver puntos oscuros en la materia. Limitarse a un solo tipo de fuente bibliográfica no es deseable. Internet, por ejemplo, permite la posibilidad de realizar sencillos experimentos en línea que pueden resultar muy ilustrativos. En temas puntuales, como la visión del color o la visión de movimientos, Internet goza de la ventaja notable sobre otros medios de transmisión de información de disponer de mayor riqueza en gráficos y de la posibilidad de animar imágenes. En contrapartida, exige del estudiante un mayor sentido crítico, para distinguir los contenidos fiables de los que no lo son.

Por otra parte, debe evitarse recurrir exclusivamente a Internet para cualquier tipo de búsqueda de información. Dada la relativa facilidad de los procedimientos de búsqueda en la red, esta tentación es grande. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, salvo en el caso de artículos de investigación, en la mayoría de los casos y por problemas de espacio, los temas no se tratan con la misma profundidad que en un libro o una revista especializada convencionales, aunque se haga con medios mucho más atractivos.

### 6.3.1 Sitios generales

<http://www.visionscience.com/>

Esta página (ver figura 6.1) contiene información general relacionada con las ciencias de la visión: noticias, información sobre cursos, vínculos a laboratorios e instituciones académicas, ofertas de becas y puestos de trabajo, así como extensa bibliografía, guías, consultorios y conexiones a multitud de otras páginas con demostraciones, software o bases de datos.

Las páginas accesibles desde este portal, mantenido por el Dr. Andrew Watson del laboratorio de visión del NASA Ames Research Center, cuentan con una garantía de fiabilidad que resulta apreciable.

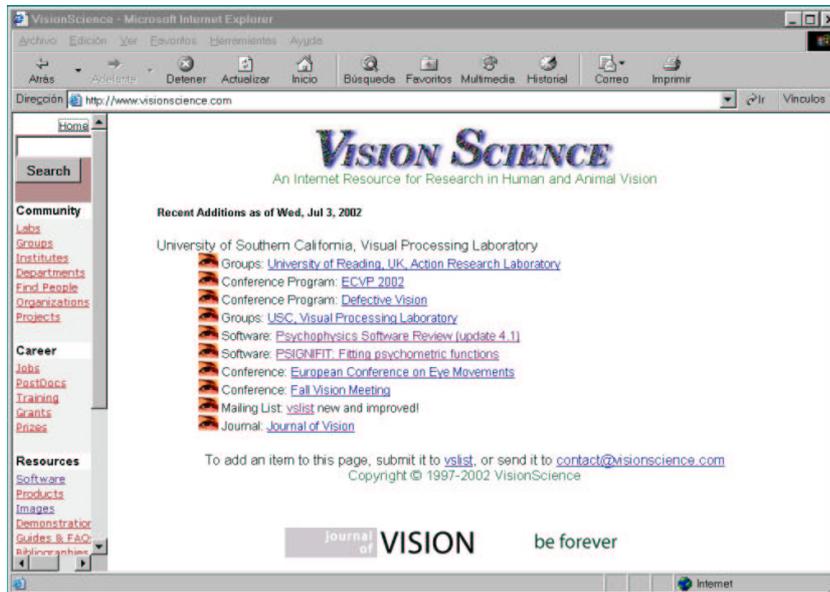


Figura 6.1: Portal sobre Vision Science <http://www.visionscience.com/> .

### 6.3.2 Bases de datos

<http://www.cvrl.org>

Color and Vision Database (ver figura 6.2), página mantenida por el Dr. Stockman y el Dr. Sharpe, en el marco del Laboratorio de Investigación de Color y Visión, proyecto de colaboración entre la Universidad de Londres y la de Tubingen. Contiene una base de datos completa sobre el sistema visual, desde datos sobre pigmentos a observadores estándar. Aunque su objetivo es proporcionar los datos básicos para científicos interesados en modelizar el sistema visual, puede ser útil para los estudiantes por dos razones. La primera, por ser una fuente de fácil acceso sobre información para resolver problemas de colorimetría (las funciones de igualación de la CIE) y sobre modelos de visión del color (distintas medidas de sensibilidad de los conos están accesibles, incluyendo las recentísimas de Stockman y Sharpe, Vision Research, 2000). La segunda, por proporcionar información sobre conceptos básicos. Y la tercera, por la bibliografía básica recomendada y los vínculos a otras páginas consagradas a la Visión del Color o a la Percepción Visual en general.

<http://colour.derby.ac.uk/>

Página red del Colour and Image Institute de la Universidad de Derby (ver figura 6.3). Desde el vínculo Info se puede acceder a distintas bases de datos, de gran interés (base de pares correspondientes, base de estadística de colores naturales, base LUTCHI con datos de apariencia del color) y a algunas demos.



Figura 6.2: Página de la Color and Vision Database <http://www.cvrl.org> .

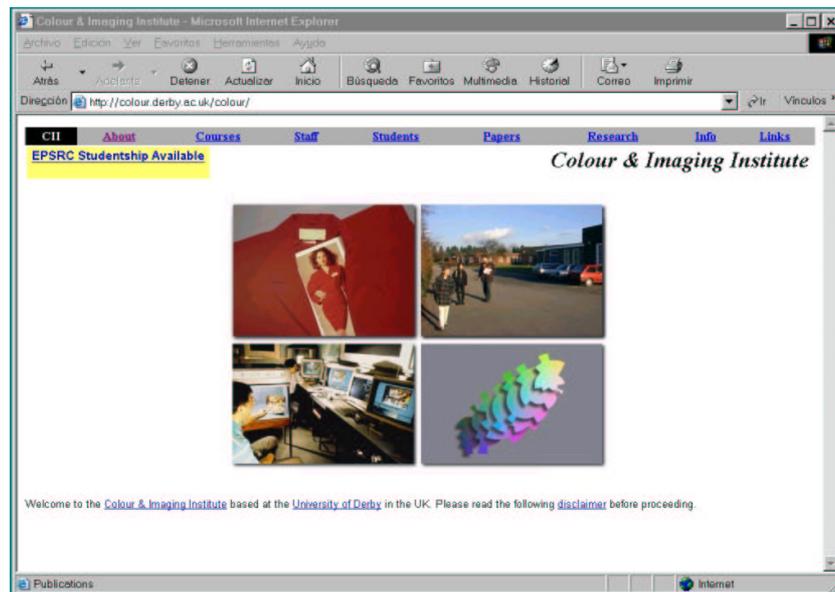


Figura 6.3: Página del Colour and Image Institute de la Universidad de Derby <http://colour.derby.ac.uk/> .

### 6.3.3 Páginas de instituciones académicas

<http://www.cns.nyu.edu/~lcv>

Página del *Laboratory of Computational Vision* del *Center for Neural Science* mantenida por el Prof. Eero Simoncelli (ver figura 6.4). Además de sus publicaciones, actividades y enlaces a otras páginas de visión y neurociencia, incluye un destacable apartado de software que contiene la librería *MatlabPyrTools* para el cálculo de representaciones corticales de imágenes.

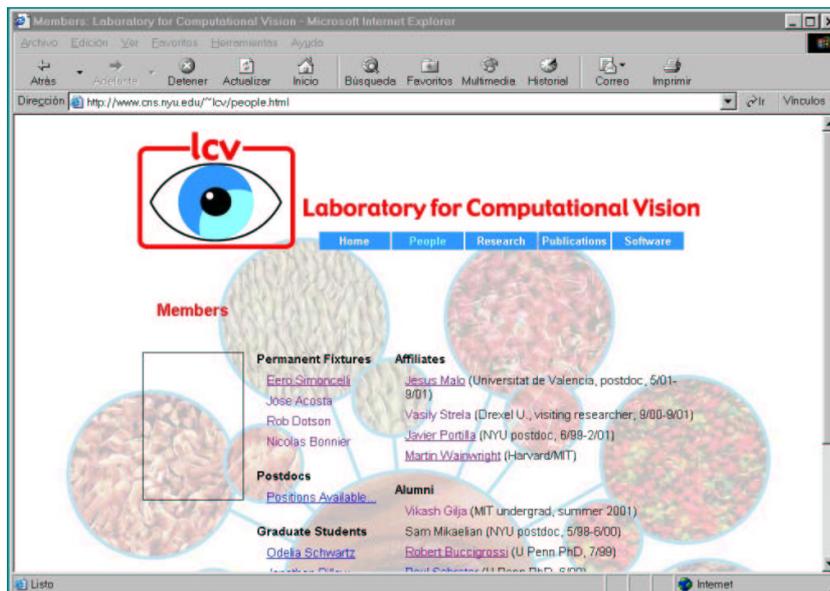


Figura 6.4: *Página del Laboratory of Computational Vision (NYU)*  
<http://www.cns.nyu.edu/~lcv>.

[http://www.city.ac.uk/optometry/visual\\_perception\\_home.html](http://www.city.ac.uk/optometry/visual_perception_home.html)

Página del Departamento de Optometría y Ciencias de la Visión de la City University de Londres (ver figura 6.5) dedicada a la asignatura de Percepción Visual y mantenida por el Dr David Thomson. La página incluye un manual de laboratorio en PDF, presentaciones en Power Point sobre diferentes temas de visión, demostraciones y vínculos a otras páginas de interés dedicadas a la Percepción Visual.

Las presentaciones son probablemente la contribución más interesante de esta página. Claras y sencillas, cubren una amplia variedad de temas básicos dentro de las asignaturas Pscofísica de la Visión, Percepción Visual y Colorimetría de este proyecto, con aspectos interesantes también en otras asignaturas de la Diplomatura: se da una rápida introducción a la formación de imágenes (Óptica Fisiológica) y a la visión binocular (Visión Binocular).

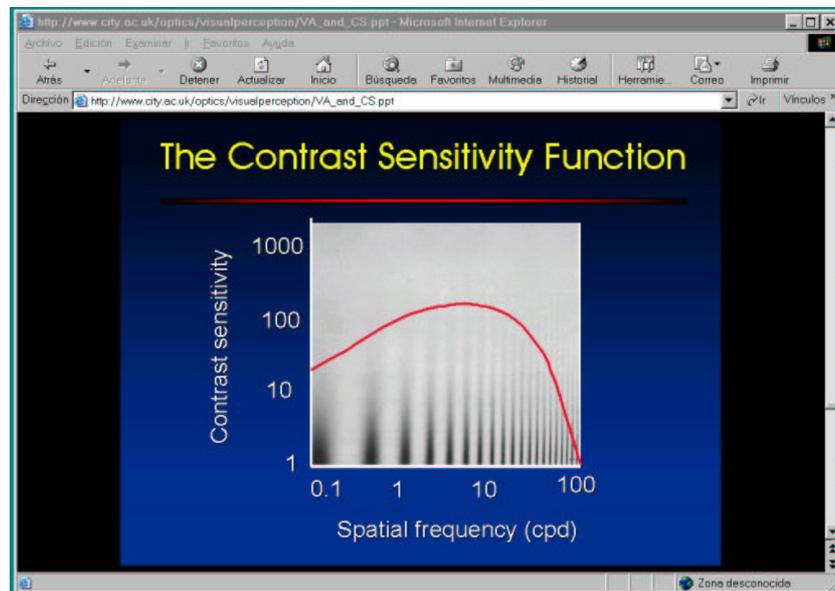


Figura 6.5: Página del Departamento de Optometría y Ciencias de la Visión de la City University de Londres [http://www.city.ac.uk/optometry/visual\\_perception\\_home.html](http://www.city.ac.uk/optometry/visual_perception_home.html).

<http://www.yorku.ca/eye/index1.htm>

Esta página (figura 6.6) contiene el libro *The Joy of Visual Perception: A Web Book* de Peter K.Kaiser, de la Universidad de York. El libro se apoya especialmente en figuras y gráficas para aclarar los conceptos. De nuevo, el material tratado cubre puntos básicos sobre Psicofísica de la Visión, Percepción Visual y Colorimetría. Como puede verse a continuación, el índice del libro no parece seguir ningún hilo lógico particular, siendo más una acumulación de temas interesantes que un curso propiamente dicho. Desde el punto de vista didáctico, sin embargo, cada tema es muy atractivo. Uno de los rasgos más sobresalientes es el diccionario en línea, el número elevado de vínculos cruzados entre temas y la inclusión de pequeñas demos. La página también permite enviar preguntas al Dr. Kaiser sobre temas específicos.

[http://psych.hanover.edu/Krantz/sen\\_tut.html](http://psych.hanover.edu/Krantz/sen_tut.html)

Página del Dr. John H. Krantz (figura 6.7), profesor del Departamento de Psicología de la Universidad de Hannover. En cada tema se incluyen pequeñas demos y problemas a resolver por el estudiante, que se corrigen en línea. Como al alumno se le explica por qué una determinada respuesta no es correcta, resulta interesante fallar intencionadamente. El mayor inconveniente es la falta de un hilo argumental. El lector pasa de un tutorial a otro según le guía su curiosidad, pero no se le sugiere ningún orden determinado, lo que le obligará a moverse de

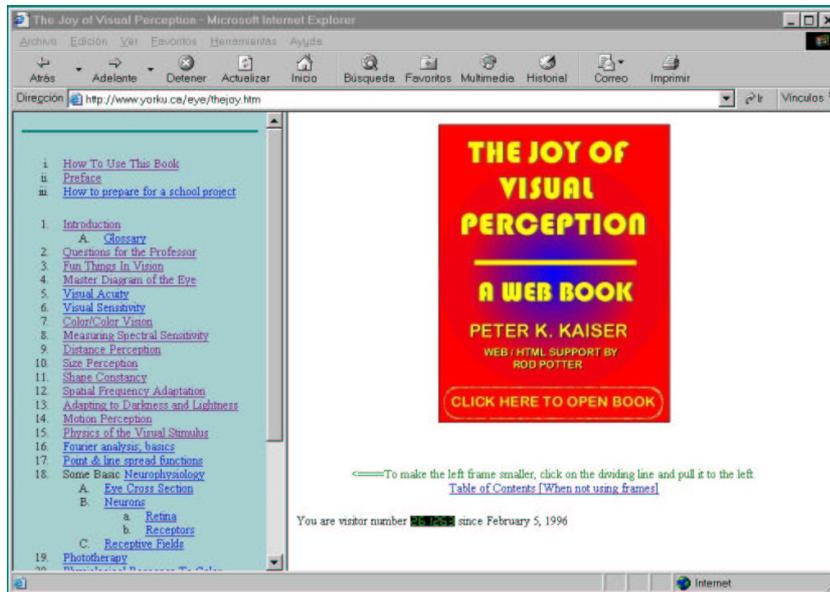


Figura 6.6: Página con el libro virtual The Joy of Visual Perception: A Web Book <http://www.yorku.ca/eye/index1.htm>.

un tema a otro, a medida que vaya encontrando lagunas.

<http://taz.uv.es/~jmalo>

Página red del Dr. Jesús Malo López, del Dpto. de Óptica de la Universidad de Valencia (figura 6.8). En esta página está accesible para su descarga la librería de funciones COLORLAB para MATLAB, desarrollada por diversos miembros de nuestro Departamento. Se acompaña con ejemplos ilustrativos del potencial de dicha librería y con un manual.

Los estudiantes de *Colorimetría y Métodos no invasivos de diagnóstico clínico* utilizan dicha librería para la resolución de problemas colorimétricos y el diseño de tests de visión, respectivamente. En *Psicofísica de la Visión*, COLORLAB se utiliza en la generación de tests para experimentos de laboratorio, de los que los estudiantes son simples usuarios.

#### 6.3.4 Demos on-line

<http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/research.html>

La página del Dr. Hans Irtel, de la Universidad de Mannheim (figura 6.9), incluye demostraciones en línea sobre distintos efectos de la visión del color. Sin embargo, su interés principal consiste en un programa descargable, Color Vision Demonstrations, que permite generar estímulos colorimétricamente controlados para realizar un amplio rango de experimentos de visión del color, lo que lo

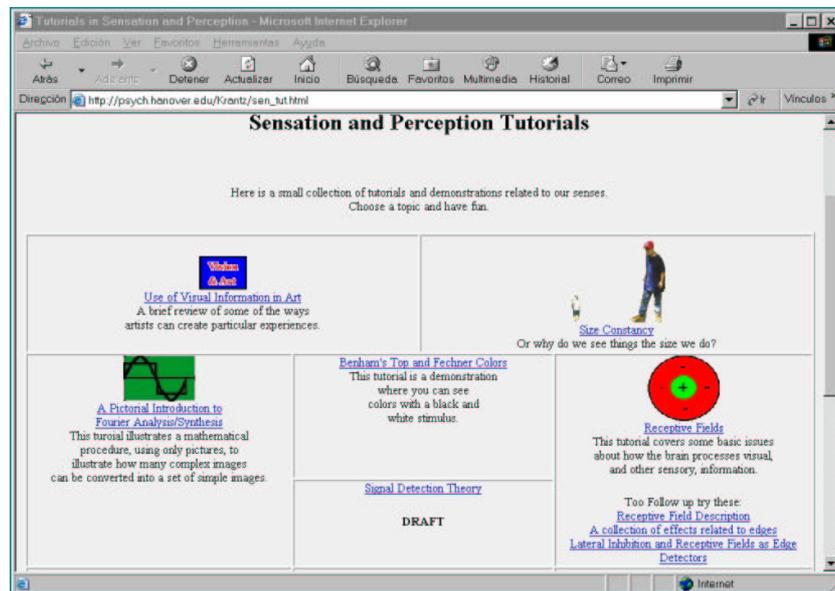


Figura 6.7: Página del Dr. John H. Krantz, profesor del Departamento de Psicología de la Universidad de Hannover [http://psych.hanover.edu/Krantz/sen\\_tut.html](http://psych.hanover.edu/Krantz/sen_tut.html).

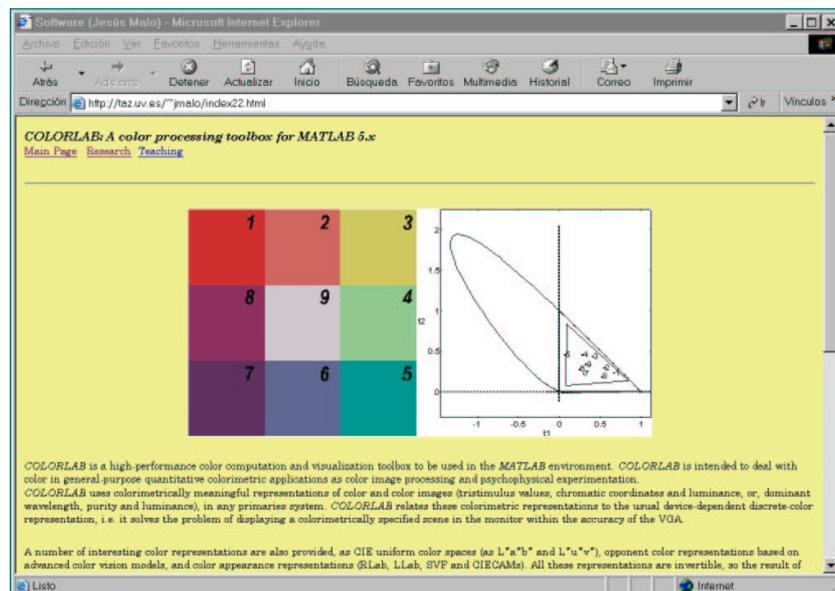


Figura 6.8: Página del COLORLAB, Universitat de València <http://taz.uv.es/~jmalo>.

convierte en una herramienta útil como complemento ilustrativo en *Psicofísica de la Visión* y *Colorimetría*. No obstante, al no ser un software programable (se trata de una librería cerrada) no tiene la flexibilidad de COLORLAB.

Cada experimento va acompañado de una breve descripción, que no siempre es suficiente para comprender el problema, y una bibliografía reducida.

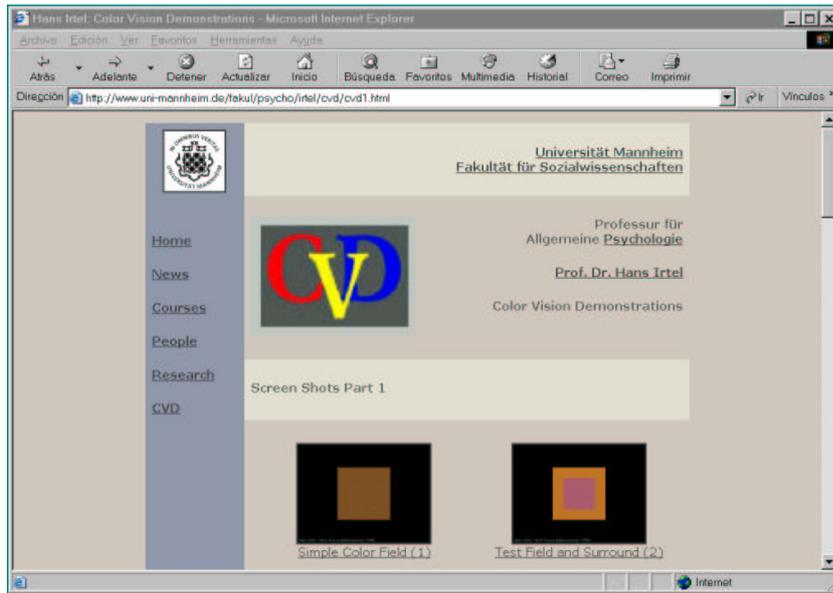


Figura 6.9: *Página del Color Vision Demonstrations* <http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/research.html>.

<http://www.klab.caltech.edu/index.shtml>

Dentro de la página del *Koch Vision Lab* del *California Institute of Technology* (figura 6.10) puede accederse a la página dedicada a las ilusiones visuales (color, forma, movimiento y estereopsis), elaborada por el Dr. Seckel. Esta página incluye una breve historia de cada efecto y, en algunos casos, un intento de explicación del mismo. La procedencia de las imágenes que ilustran los efectos es variada, desde artistas a científicos que trabajan en visión. Es más una página de divulgación que una página científica, pero las demos incluidas valen la pena, así como que se insista en considerar a las ilusiones visuales como métodos para poner de manifiesto las reglas de funcionamiento del sistema visual. Aunque no en todos los casos el efecto se acompaña de bibliografía, cuando esto ocurre la bibliografía citada es interesante.



Figura 6.10: *Página de ilusiones visuales comentadas*  
<http://www.klab.caltech.edu/index.shtml>.

## Capítulo 7

# Proyecto de Investigación

En este capítulo incluyo las líneas generales del proyecto de investigación que hemos presentado en la última convocatoria del Ministerio de Ciencia y Tecnología, del que soy investigador responsable (Coordinador e Investigador Principal del subproyecto de la Universitat de València).

Se trata de un proyecto coordinado (en colaboración con el Dpto. de Ciencias de la Computación de la Universidad de Granada y el Instituto de Óptica del CSIC) y por lo tanto, no personal. No obstante, me parece adecuado incluir la información de los otros subproyectos para enfatizar las ramificaciones de las ideas centrales del proyecto. Estas ideas representan una profundización en diferentes líneas relacionadas con la Percepción Visual en las que he venido trabajando en estos últimos años.

El título *oficial* del proyecto es: *Modelos No-Gaussianos para la Representación de Imágenes y Secuencias: Aplicaciones a Codificación, Síntesis, Restauración y Registro de Imágenes y Vídeo*, con referencia CICYT TIC 2002-03188.

### 7.1 Resumen

El núcleo de multitud de aplicaciones prácticas relacionadas con la transmisión y el uso de información visual es la elección de una adecuada representación de las imágenes, estáticas y en movimiento. En este sentido, cada vez están cobrando más relevancia los modelos de representación basados en visión biológica y en la estadística de las imágenes naturales. Desde un punto de vista aplicado, dichas formas de representación surgen de manera natural en contextos (p.e. MPEG-4 y MPEG-7) en los que i) la medida de la distorsión debe tener carácter subjetivo, y ii) se busca explotar al máximo la redundancia presente en la señal. Debido a los avances en la interpretación estadística de la percepción humana, esta aproximación interdisciplinar resulta cada vez más atractiva y fructífera.

Las soluciones convencionales al problema de la selección de la representación consisten en transformaciones lineales (adaptativas como la KLT o el PCA, el ICA lineal, o de base fija, como la DCT y las wavelets), que asumen que la

función densidad de probabilidad del conjunto de patrones a analizar es factorizable tras un giro y un escalado del espacio de representación de la señal. La realidad de las imágenes naturales, no gaussianas, no se ajusta a esta aproximación, por lo que la eficiencia de los sistemas que utilizan estas representaciones lineales se ve grandemente disminuida.

El objetivo general del presente proyecto es el estudio de representaciones no lineales multipropósito que permitan describir eficientemente las imágenes naturales, desde un punto de vista tanto perceptual como estadístico. Basándonos en modelos de procesamiento no-lineal del sistema visual humano, buscamos representar las señales respecto de componentes realmente independientes y perceptualmente significativos, superando las limitaciones de las transformaciones lineales.

El desarrollo de estas representaciones permitirá abordar objetivos prácticos que lleven a la mejora de una variedad de algoritmos en los que hemos venido trabajando con anterioridad: compresión de vídeo, descripción y síntesis de texturas, restauración de imágenes, registro y análisis del movimiento. En particular, la empresa colaboradora (FERMAX Electrónica S.A.) está interesada en el estudio de las mejoras que pueden aportar estas técnicas en sus sistemas de video-telefonía, toda vez que en proyectos anteriores [CICYT TIC 1FD 97-0279, CICYT TIC 1FD 97-1910] identificamos el módulo de representación (transformación+cuantización) como el más importante en el proceso de codificación.

## 7.2 Limitaciones de las técnicas de representación convencionales (lineales)

Las muestras de las imágenes y secuencias naturales presentan una fuerte dependencia debido a que reflejan la estructura de los objetos presentes en las escenas. Por este motivo, el modelado de las imágenes naturales en un dominio espacio-temporal es complejo, y su tratamiento en este dominio es ineficiente. Para solucionar este problema, se utilizan transformaciones de la señal cuyo objetivo es llegar a una representación en la que se simplifique la descripción de la señal porque idealmente se hayan eliminado las dependencias entre sus componentes [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Las transformaciones a aplicar dependen de las propiedades estadísticas de las señales con las que se trabaje. En particular, es bien conocido que si se trata con señales gaussianas el problema de la representación queda bien resuelto mediante transformaciones lineales (giros en el espacio de representación de la imagen).

La aproximación al problema de la representación mediante transformaciones lineales globales adaptadas a los ejes propios de la función densidad de probabilidad (KLT o PCA) y sus versiones locales con funciones base fijas (DCTs locales y wavelets) ha cosechado grandes éxitos en la última década en un amplio abanico de aplicaciones que incluye la codificación de imágenes y vídeo [7, 8, 9, 10], la descripción y síntesis de texturas [11, 12, 13, 14], la

restauración y eliminación de ruido [15, 16, 17], las medidas perceptuales de distinguibilidad [18, 19, 20, 21, 22, 23] la fusión de imágenes [24, 25] y la estimación de movimiento, el registro de imágenes o el cálculo de la disparidad binocular [26, 27, 28, 29].

La potencia de este tipo de descomposiciones de la imagen reside en que son capaces de capturar (y eliminar) las dependencias estadísticas de bajo orden existentes entre las muestras originales, haciendo accesibles, además, algunas dependencias de más alto orden [30, 31, 32]. Por otra parte, la naturaleza local y la selectividad a escalas y orientaciones de las funciones base las hace útiles para múltiples tareas de procesamiento posterior [33, 12, 14, 34, 35].

Desafortunadamente, las imágenes naturales no siguen una función densidad de probabilidad (PDF) gaussiana [36, 37, 31]. Esto implica que el uso de estas transformaciones lineales convencionales, si bien es un paso necesario que elimina las correlaciones de segundo orden, no consigue la desaparición de relaciones de orden superior entre las componentes de la transformada (piénsese por ejemplo que existe una fuerte correlación entre la magnitud de los coeficientes de una transformada wavelet cualquiera a diferentes escalas [31, 38]). Como consecuencia, la descripción que realizan de la imagen es todavía incompleta y resulta insuficiente para plantear un modelo sencillo (escalar) y así procesar independientemente las diferentes componentes.

Recientemente se han propuesto técnicas lineales alternativas al PCA, el así llamado Análisis en Componentes Independientes (ICA) [39, 40, 41, 42], que abordan justamente este problema. La aplicación de estas técnicas a imágenes y secuencias naturales da como resultado funciones base de tipo wavelet [43, 6], lo que constituye una explicación adicional de la utilidad empírica de las wavelets. Sin embargo, cuando los estímulos no son una combinación lineal de componentes independientes las técnicas ICA son incapaces de factorizar las PDFs involucradas [6].

Ignorar que las transformadas lineales no eliminan completamente la dependencia entre las componentes, tiene consecuencias negativas en todas las aplicaciones prácticas citadas anteriormente:

- En codificación se producen errores de reconstrucción debido a la interacción de la cuantización de diferentes coeficientes de la transformada [44, 45].
- La descripción de texturas resulta muy limitada si no se incluyen interacciones cruzadas entre coeficientes vecinos de la representación transformada [46].
- Los algoritmos de restauración que no consideran las dependencias cruzadas entre coeficientes vecinos son ineficientes comparados con los que consideran vecindades de coeficientes [47, 48, 17].
- En aplicaciones de fusión se producen errores de reconstrucción debido a la interacción de coeficientes procedentes de imágenes diferentes [24].

- Los algoritmos de estimación de movimiento/registro carecen de robustez en regiones con cambio de iluminación debido a que no se considera el cambio local de energía en los coeficientes vecinos [28].

### 7.3 Alternativas: uso de transformaciones no-lineales de carácter estadístico y perceptual

La descripción computacional de las primeras etapas de la visión humana (en particular el procesado realizado en el área V1 del córtex) presenta similitudes con el esquema básico empleado en múltiples algoritmos de procesado de imágenes:

- Etapa lineal de análisis en componentes wavelet (con funciones base espacialmente localizadas y selectivas a escala y orientación) [49, 50].
- Aplicación de interacciones no-lineales que normalizan localmente la salida de los filtros lineales [51, 52, 53].

Según los autores interesados en el estudio computacional de la visión humana [54, 55, 30, 56, 57, 58, 59] la razón de esta similitud es que los sistemas biológicos se enfrentan al mismo tipo de problemas de análisis. Así, las formas de procesamiento han evolucionado para optimizar el rendimiento en cuanto a la cantidad de información procesada en un contexto de recursos limitados, de manera que se han ido adaptando a las características relevantes de los estímulos (imágenes naturales).

En los modelos perceptuales más recientes las no linealidades que ocurren tras la etapa lineal implican una interacción local de las salidas de los filtros [51, 52], que puede entenderse como una normalización de la energía local. Se ha demostrado que esta forma de interacción tiene consecuencias positivas, al reducir significativamente la dependencia estadística de las respuestas [60, 61]. A pesar de los citados avances, el uso de estas ideas en aplicaciones de procesado de imágenes está todavía iniciándose. Existe un gran potencial por explotar que incluya interacciones más potentes para decorrelacionar estadísticos de alto orden. Por ejemplo, en el pasado se han utilizado modelos lineales de visión humana y no linealidades de tipo simple (sin interacción entre los coeficientes) con gran éxito en codificación [8, 9, 62]. Sin embargo, las consecuencias de la aplicación de no linealidades vectoriales (normalización con interacción de magnitud y fase entre coeficientes) están todavía poco exploradas.

### 7.4 Finalidad del proyecto.

La finalidad genérica este proyecto coordinado consiste en modelar las imágenes naturales en el dominio transformado haciendo uso de no linealidades perceptuales para factorizar la PDF que describa las características habituales y per-

ceptualmente relevantes de las imágenes y secuencias naturales. Esta representación en componentes no-lineales más independientes permitirá incrementar la potencia de una variedad de aplicaciones basadas hoy en día mayoritariamente en técnicas lineales.

Los diferentes sub-proyectos (U.Valencia, U.Granada, CSIC Madrid), en paralelo al trabajo coordinado en el problema de la representación, aplicarán las soluciones no lineales en los siguientes campos: Codificación de Vídeo (Valencia), Síntesis de Texturas y Restauración (Granada), y Registro de Imágenes y Estimación de Movimiento (Madrid).

### 7.4.1 Codificación de vídeo.

La aplicación de compresión de vídeo representa un excelente nexo de unión en el proyecto, porque abarca una variedad de sub-problemas tratados en los diferentes sub-proyectos. Los problemas que aparecen en la codificación de vídeo son los siguientes [63, 9, 4, 64]:

- *Estimación de movimiento* para predecir el comportamiento de la señal. Si la señal fuese completamente predecible dada una cierta información de movimiento, tan solo serían necesarios los primeros fotogramas de la secuencia y la información de movimiento para reconstruir la señal. Debido a las limitaciones de la estimación de movimiento (básicamente flujo óptico [9, 4]) es necesario incluir en la señal codificada información adicional correspondiente a los errores de predicción. Estos errores de predicción representan la mayor parte del volumen de la señal codificada final [65, 66].
- *Representación y simplificación de los errores de predicción.* Debido al volumen de los errores de predicción, es necesario representarlos y simplificarlos adecuadamente para minimizar su impacto en el ancho de banda manteniendo una distorsión limitada [4]. En este contexto, se hace evidente la necesidad de un adecuado espacio de representación de la señal para el diseño de los algoritmos de cuantización [1]. La DCT y las wavelets constituyen las herramientas estándar que se aplican en este caso por las propiedades estadísticas y perceptuales comentadas anteriormente.
- *Síntesis de la imagen en el decodificador.* La misión del decodificador es reconstruir la secuencia a partir del flujo de datos procedente del codificador [63]. Habitualmente (en los actuales estándares) esta reconstrucción consiste en recuperar los fotogramas a partir de la información de movimiento y los errores de predicción cuantizados. Desde un punto de vista más general, podemos entender esta reconstrucción de una forma alternativa, basada en parte en un proceso de síntesis aleatoria de texturas perceptualmente similares a las originales [67].

En el pasado reciente hemos abordado los problemas de estimación de movimiento [68, 66] y diseño del cuantizador [7, 69, 70] en el contexto de codificación de vídeo aplicando modelos no lineales simples de visión humana. En este

sentido hemos llegado a tres conclusiones importantes: (1) Las técnicas recomendadas empíricamente en los estándares MPEG y H.263 pueden obtenerse analíticamente en el marco de la teoría de la *rate-distortion* con una distorsión basada en un modelo lineal de visión humana. (2) Si este modelo lineal se amplía incluyendo no linealidades perceptuales de tipo simple en los algoritmos de cuantización, los resultados mejoran sustancialmente. (3) Dado el interés de la relación existente entre los procesos de estimación de movimiento y representación-cuantización [71, 72, 65], hemos demostrado que la representación y el cuantizador son mucho más relevantes que la estimación de movimiento usada en la actualidad [62, 73, 74].

Por todo ello, nos planteamos abordar en profundidad el problema de la representación no-lineal de la señal, utilizando modelos de normalización local de la transformada wavelet). Resultados preliminares [44, 61, 45] indican que el proceso de cuantización va a verse simplificado, obteniendo mejor calidad de imagen para las mismas tasas de compresión.

#### 7.4.2 Descripción y síntesis de texturas. Restauración de imágenes basada en un modelo de imagen.

Julesz puso los cimientos del *modelado de la textura visual* planteando la conjetura de que la percepción rápida (previa al escrutinio) de la textura dependía únicamente de un conjunto finito de estadísticos de la imagen correspondiente [75]. De esta forma se establece un nuevo vínculo entre percepción visual y estadística (tras [54]). El objetivo planteado es encontrar un conjunto necesario y suficiente de estadísticos que describan las características visuales de todas las texturas.

La estrategia de *síntesis-por-análisis* (obtención de imágenes sintéticas aleatorias que comparten un conjunto de estadísticos muestrales con una o varias imágenes analizadas) [76, 14] constituye un mecanismo de validación eficiente de la descripción estadística elegida. Desde que en 1995 se propuso un algoritmo iterativo no-lineal para la síntesis de texturas basado en una representación wavelet de la imagen [13] existe un creciente interés por esta aproximación al modelado de la textura. Ese método permitía reproducir características asociadas a estadísticos de alto orden, que no se habían obtenido hasta entonces en imágenes sintéticas aleatorias. En trabajos posteriores [77, 46] se han conseguido imágenes aleatorias sintéticas de mayor realismo. Esto ha sido posible en gran parte gracias a la introducción de dependencias no lineales entre las respuestas de las etapas lineales. Una parte importante de estas interacciones se corresponde con modelos de energía local, ya mencionados. Pero otras características no pueden capturarse modelando únicamente el comportamiento estadístico de la magnitud de los coeficientes, si no que hay que considerar también su fase. En [46] se utilizó para tal fin una representación sobre-completa con wavelets complejas (en los últimos años se ha extendido el uso de wavelets complejas, ver p. ej. [78]) y un modelo de intersección y proyección sucesiva en estadísticos muestrales (que fue aplicado también con éxito a la eliminación de ruido [79]). Esto permitió, entre otras cosas, reproducir efectos de percepción

3-D sin recurrir a modelos de la iluminación ni de la superficie iluminada. A pesar de estos avances, quedan muchos aspectos por resolver en el modelado de la textura. Asociado al problema de la fase, los modelos actuales no reproducen satisfactoriamente una de las características fundamentales de las imágenes naturales: la existencia de bordes y líneas de distinta polaridad y orientación. Además, en el citado trabajo no se explicitaba la función densidad de probabilidad de un coeficiente dados sus vecinos, como sería deseable.

La *restauración* es un problema en el que dada la observación de una imagen degradada (típicamente por convolución y adición de ruido [80], o por artificios debidos a una compresión con pérdidas [81]) se estima la imagen original más verosímil, de acuerdo a un criterio de optimización, y a modelos estadísticos de la perturbación y de la propia imagen. El modelo de la imagen (probabilidad a priori) juega un papel fundamental: cuanto más completo, mayor es la discriminabilidad que proporciona respecto al ruido y mayor la capacidad de inferir detalles de la imagen original a partir de la imagen distorsionada.

Las formas de representación de imágenes que separan las distintas posiciones, escalas y orientaciones, como las wavelets, proporcionan una potencia para eliminar selectivamente el ruido con la que no pueden competir ni los modelos globales (p. ej., Wiener tradicional) ni los modelos locales en el dominio espacial (p. ej., Wiener local [82]). Por ello, una de las primeras aplicaciones de las wavelets al procesado de imágenes fue la eliminación de ruido [15]. Se ha demostrado [83, 84] que las wavelets sobre-completas son superiores a las wavelets no redundantes para esta tarea. Particularmente, los modelos adaptativos basados en una medida de energía local han resultado ser los más eficaces hasta la fecha [47, 48, 85, 17]. Este tipo de métodos está conceptualmente muy próximo a los modelos de normalización de la energía local, utilizando el mismo tipo de dependencias no lineales entre las respuestas de los filtros. Entre los modelos estadísticos que mejor reflejan estas dependencias están los campos aleatorios de Markov con variables escondidas (Hidden Markov Models, HMM, [86]) y la mezcla en escala de gaussianas (Gaussian Scale Mixture, GSM, [87, 88]). En [17] se utilizó un modelo GSM con un enfoque bayesiano local obteniéndose los mejores resultados hasta la fecha en eliminación de ruido aditivo gaussiano. Las perspectivas a corto plazo son que este tipo de modelos se puede aplicar igualmente para estimar imágenes afectadas, además de por ruido, por desenfoque u otras formas de distorsión lineal. Por otro lado, la inclusión de interdependencias relacionadas con la fase local de las respuestas ha de proporcionar una disminución notable en la entropía condicional de los coeficientes, con la consiguiente mejora en la estimación. Además, pensamos que, reformulando el modelo GSM en forma de HMM, éste podría utilizarse para otras tareas, como la inferencia de detalles a partir de una imagen de baja resolución (super-resolución [89]), para la cual la información de fase es vital.

### 7.4.3 Registro de imágenes y estimación robusta de movimiento.

Existen una serie de propiedades muy interesantes que emergen cuando se aplican las no-linealidades perceptuales a una representación wavelet. Dichas propiedades son susceptibles de incrementar la potencia de la representación lineal, así como el abanico de tareas de análisis para las cuales es apropiada. Estas propiedades ya han sido puestas de manifiesto cuando se definieron los modelos de normalización para la caracterización funcional de las respuestas de las células del área V1 en la corteza visual de los mamíferos [90, 51, 91]. Las respuestas de estas células ante la presentación de variados estímulos presentan dos características muy importantes: 1) saturación para altos contrastes, debido al rango dinámico limitado de las neuronas, como ocurre con cualquier sistema físico; 2) conservación de la respuesta relativa entre dos células, a pesar de estar en la región de saturación. Esta última característica es muy importante porque significa que incluso en la región de saturación, nuestro sistema visual sigue siendo capaz de realizar un análisis por escalas y orientaciones basándose en la respuesta relativa de las células sintonizadas a distintas escalas y orientaciones. Sin esta propiedad, un contraste muy alto del estímulo de entrada podría llevar al mismo nivel de saturación a todas las células, perdiéndose la capacidad de análisis de escalas y orientaciones del esquema de representación.

Las propiedades anteriores hacen que la respuesta normalizada sea aproximadamente invariante a cambios en el contraste, lo que puede ser muy beneficioso en determinadas aplicaciones de análisis. Una aplicación con especial interés es el *registro* de imágenes. El objetivo del registro es la estimación de la transformación geométrica que alinea dos imágenes de la misma escena u objeto, tomadas bajo diferentes condiciones (cámaras en distintas posiciones espacio-temporales -estimación de movimiento [92], diferentes modalidades de adquisición -fusión de imágenes-) [93]. En el caso de que estas imágenes hayan sido tomadas con diferentes modalidades de adquisición, el problema del registro se complica tremendamente, al no poderse establecer una correspondencia directa entre los niveles de gris de ambas imágenes [94, 28]. Este es un caso frecuente en muchas aplicaciones. Por ejemplo, en aplicaciones de vigilancia que cuentan con imágenes de la misma escena tomadas con cámaras de visible y de infrarrojo; también, y de especial interés son las aplicaciones médicas en las que se usan dos modalidades de captación de imagen diferentes para explorar la misma región del cuerpo, como pueden ser imagen de resonancia magnética y tomografía por rayos X. En estas aplicaciones resulta fundamental alinear las imágenes de manera que ambas estén en un marco de referencia común, y se pueda proceder a comparar, fundir y/o integrar la información presente en ambas imágenes. Es en estos casos donde la respuesta invariante al contraste de los modelos de normalización puede ser útil, ya que una vez que las dos imágenes han sido trasladadas al sistema de representación normalizado sí sería posible establecer correspondencias entre los coeficientes normalizados, que son independientes de cambios locales en el contraste causados por las distintas modalidades de adquisición.

Un caso particular de registro de imágenes es el de la *estimación de movimiento* en secuencias de imágenes (flujo óptico). En esta aplicación es habitual presuponer que los niveles de gris se conservan de un cuadro al siguiente. Esta suposición puede dejar de ser realista en determinados escenarios, como aquellos en los que cambia la iluminación de la escena (por ejemplo, cuando un objeto se mueve de una zona iluminada a una zona en sombra). En estos casos, una representación con respuestas invariantes al contraste será también muy útil para incrementar la robustez de los algoritmos de estimación de movimiento.

## 7.5 Contexto del proyecto: consolidación del trabajo iniciado en proyectos anteriores y posibilidades de transferencia tecnológica

Este proyecto coordinado pretende unir los esfuerzos de los grupos españoles que están trabajando en la aplicación de modelos computacionales de visión humana a las técnicas de análisis y procesado de imágenes. Además consolidará los vínculos internacionales iniciados hace unos años, con la participación de algunos de los investigadores extranjeros de mayor prestigio en este campo: A.B. Watson (Ames Research Center, NASA), E.P. Simoncelli (Center for Neural Science and Courant Institute of Mathematics, New York University) y D. Heeger (Dept. of Psychology, Stanford University). Esta línea de investigación multidisciplinar genera una interacción muy fructífera entre diferentes ámbitos de la ingeniería, física, matemáticas y neurociencia. En España, aun teniendo científicos formados a alto nivel, hace falta estimular los vínculos entre ellos, de forma que se adquiera una masa crítica que favorezca a corto plazo la consolidación definitiva de estas líneas de investigación. Por eso, los grupos más activos en el modelado computacional de la visión humana, con proyectos previos financiados en esta línea (U. Valencia, Dpto. Informática - Dpto. Óptica CICYT TIC 1FD 97-0279 [95], U. Granada, Dpto. Ciencias Comp. e IA, CICYT PB98-1374 [96] y CSIC Inst. Optica, CICYT TIC98-0925-CO2-01 [97]) hemos decidido unirnos en este esfuerzo común.

Los objetivos del proyecto no se circunscriben al ámbito teórico, porque tenemos experiencia en la transferencia tecnológica en el marco de proyectos previos (CICYT 1FD 97-0279 [95] y CICYT 1FD 97-1910 [98]). El presente proyecto coordinado sigue esa línea, contando de nuevo con el apoyo de FERMAX Electrónica SAE (multinacional española líder en el mercado de la video-telefonía). El interés de la empresa se basa en los resultados de proyectos anteriores, en los que identificamos el módulo de transformación+cuantización como el más estratégico en los actuales sistemas de codificación de vídeo.



# Bibliografía

- [1] A. Gersho and R.M. Gray. *Vector quantization and signal compression*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1992.
- [2] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork. *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley & Sons, second edition, 2001.
- [3] K. Fukunaga. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. Academic Press, 1990.
- [4] A.M. Tekalp. *Digital Video Processing*. Prentice Hall, NJ, 1995.
- [5] R.C. Gonzalez and R.E. Woods. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Pub Co, 2nd edition edition, 2002.
- [6] B.O. Olshausen E.P. Simoncelli. Natural image statistics and neural representation. *Annu. Rev. Neurosci.*, 24:1193–1216, 2001.
- [7] J. Malo, A. Pons, and J.M. Artigas. Bit allocation algorithm for codebook designin vector quantization fully based on hvs non-linearities for suprathreshold contrasts. *Electronics Letters*, 31(15):1222–1224, 1995.
- [8] G.K. Wallace. The jpeg still picture compression standard. *Comm. ACM*, 34(4):31–43, 1991.
- [9] D. LeGall. Mpeg: A video compression standard for multimedia applications. *Comm. ACM*, 34(4):47–58, 1991.
- [10] Andrew B. Watson. Dct quantization matrices visually optimized for individual images. In *Proceedings SPIE, Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV*, pages 202–216, Bellingham, WA, 1993.
- [11] I. Fogel and D. Sagi. Gabor filters as texture discriminator. *Journal of Biological Cybernetics*, 61:103–113, 1989.
- [12] K. Jain and F. Farrokhnia. Unsupervised texture segmentation using gabor filters. *Patt. Recog.*, 24:1167–1186, 1991.
- [13] D. Heeger and J.R. Bergen. Pyramid based texture analysis/synthesis. *Computer Graphics Proceedings*, pages 229–238, 1995.

- [14] O. Nestares J. Portilla, R. Navarro and A Tabernero. Texture synthesis-by-analysis based on a multiscale early-vision model. *Optical Engineering*, 35:2403–2417, 1996.
- [15] D.L. Donoho and I. M. Johnstone. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. *Biometrika*, 81:425–455, 1994.
- [16] E.P. Simoncelli. Bayesian denoising of visual images in the wavelet domain. In P. Müller and B. Vidakovic, editor, *Bayesian Inference in Wavelet Based Models*, volume 141, chapter 18, pages 291–308. Springer-Verlag, New York, 1999.
- [17] J. Portilla, V. Strela, M. Wainwright, and E. P. Simoncelli. Adaptive wiener denoising using a gaussian scale mixture model in the wavelet domain. In *8th IEEE Int'l Conf on Image Processing*, pages 37–40, Thessaloniki, Greece, October 2001.
- [18] J. Malo, A. Pons, and J.M. Artigas. Subjective image fidelity metric based on bit allocation of the human visual system in the dct domain. *Image & Vision Computing*, 15:535–548, 1997.
- [19] A. B. Watson and J. Malo. Video quality measures based on the standard spatial observer. In *Proc. IEEE Int'l. Conf. Im. Proc.*, Rochester, NY, 2002.
- [20] J. Mtnez-Baena, J.A. Garcia, J. Fdez-Valdivia, and J. Chamorro-Mtnez. Developing perceptual distortion measures using visual perception models. In *VIII Congreso de la AERFAI*, pages 275–280, Barcelona, 1997.
- [21] X. Fdez-Vidal., R. Rodriguez-Sanchez, J. Chamorro-Mart nez, and M.C. Aranda. Computing visual target distinctness through integral opponen-color features. *Pattern Recognition and Applications*, pages 154–63, 2000.
- [22] X. Fdez-Vidal., R. Rodriguez-Sanchez, J Mtnez-Baena, and J. Chamorro-Mart nez. Image representational model for predicting visual distinctness of objects. In *15th International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 689–94, Barcelona, 2000.
- [23] J.A. Garcia, J. Fdez-Valdivia, X.R. Fdez-Vidal, Rosa Rod-Sanchez, and J. Chamorro-Martinez. Comparing computational models for predicting visual target distinctness. In *Recent Research Developments in Pattern Recognition II*. In press, 2002.
- [24] J. Santamaria and M. T. Gomez. Visible-IR image fusion based on gabor wavelets decomposition. In *EOS Annual Meeting*, pages 97–98, 1993.
- [25] H. Li, B.S. Manjunath, and S.K. Mitra. Multisensor image fusion using the wavelet transform. *Graph. Mod. Im. Proc.*, 57(3):235–245, 1995.

- [26] Andrew B. Watson and Albert J. Ahumada Jr. Model of human visual-motion sensing. *Journal of the Optical Society of America A*, 2(2):322–342, 1985.
- [27] D. Heeger. Model for the extraction of image flow. *J. Opt. Soc. Am. A*, 4:1455–1471, 1987.
- [28] O. Nestares and D. J. Heeger. Robust multiresolution alignment of mri brain volumes. *Magnetic Resonance in Medicine*, 43:705–715, 2000.
- [29] O. Nestares and R. Navarro. Probabilistic estimation of optical flow in multiple band-pass directional channels. *Image and Vision Computing*, 19:339–351, 2001.
- [30] D.J. Field. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells. *J. Opt. Soc. Am. A*, 4(12):2379–94, 1987.
- [31] E. P. Simoncelli. Statistical models for images: Compression, restoration and synthesis. In *31st Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*, pages 673–678, Pacific Grove, CA, 1997. IEEE Computer Society.
- [32] B. A. Olshausen and D. J. Field. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images. *Nature*, 381:607–609, 1996.
- [33] J. Malik and P. Perona. Preattentive texture discrimination with early vision mechanisms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 7:923–932, 1990.
- [34] O. Nestares, R. Navarro, J. Portilla, and A Tabernero. Automatic computation of the area irradiated by ultrashort laser pulses in sb materials through texture segmentation of tem images. *Ultramicroscopy*, 66:101–115, 1996.
- [35] R. Navarro, A. Tabernero, and G. Cristobal. Image representation with gabor wavelets and its applications. In P.W. Hawkes, editor, *Advances in Imaging and Electron Physics*, pages 1–84. Academic Press, San Diego, 1996.
- [36] S. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 11:674–693, 1989.
- [37] A. Said and W. A. Pearlman. An image multiresolution representation for lossless and lossy image compression. *IEEE Transactions on Image Processing*, 5(9):1303–1310, 1996.
- [38] R.W. Buccigrossi and E.P. Simoncelli. Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain. *IEEE Trans. Image Proc.*, 8(12):1688–1701, 1999.

- [39] P. Comon. Independent component analysis: A new concept? *Signal Processing*, 36(3):287–314, 1994.
- [40] J.F. Cardoso. Source separation using higher order moment. In *Int. Conf. Acoustics Speech Signal Proc.*, pages 2109–12, 1989.
- [41] A.J. Bell and T.J. Sejnowski. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural Computation*, 7:1129–1159, 1995.
- [42] E. Oja, A. Hyvarinen., and J. Karhunen. *Independent Component Analysis*. John Wiley & Sons, NY, 2001.
- [43] Anthony J. Bell and Terrence J. Sejnowski. The ‘independent components’ of natural scenes are edge filters. *Vision Research*, 37(23):3327–3338, 1997.
- [44] J. Malo, F. Ferri, R. Navarro, and R. Valerio. Perceptually and statistically decorrelated features for image representation: Application to transform coding. In *Proc. IEEE Int. Conf. Patt. Rec.*, volume 3, pages 242–245, 2000.
- [45] I. Epifanio, J. Gutierrez, and J. Malo. Linear transform for simultaneous diagonalization of covariance and perceptual metric matrix in image coding. Enviado a Pattern Recognition, Julio 2001.
- [46] J. Portilla and E. P. Simoncelli. A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients. *International Journal of Computer Vision*, 40(1):49–71, 2000.
- [47] S G Chang, Bin Yu, and Martin Vetterli. Spatially adaptive wavelet thresholding with context modeling for image de-noising. In *IEEE Int. Conf on Image Proc.*, October 1998.
- [48] K. Ramchandran M. K. Mihcak, I. Kozintsev and P. Moulin. Low-complexity image denoising based on statistical modeling of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 6(12):300–303, 1999.
- [49] Andrew B. Watson. Efficiency of an image code based on human vision. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(12):2401–2417, 1987.
- [50] J. G. Daugman. An information-theoretic view of analog representation in striate cortex. In E. Schwartz, editor, *Computational Neuroscience*, chapter 31, pages 403–423. MIT Press, Cambridge, MA, 1990.
- [51] D. J. Heeger. Normalization of cell responses in cat striate cortex. *Visual Neuroscience*, 9:181–198, 1992.
- [52] A. B. Watson and J. A. Solomon. A model of visual contrast gain control and pattern masking. *Journal of the Optical Society of America A*, 14:2379–2391, 1997.

- [53] O. Schwartz and E. P. Simoncelli. Natural signal statistics and sensory gain control. *Nature Neuroscience*, 4(8):819–825, 2001.
- [54] Barlow HB. Possible principles underlying the transformation of sensory messages. In WA Rosenblith, editor, *Sensory Communication*, pages 217–234. MIT Press, Cambridge, MA, 1961.
- [55] D. Marr. *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. W.H. Freeman and Co., 1980.
- [56] D. L. Ruderman. The statistics of natural images. *Network: Computation in Neural Systems*, 5(4):517–48, 1994.
- [57] F. Rieke, D. Warland, R. R. de Ruyter van Stevenink, and W. Bialek. *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press, 1996.
- [58] T. Poggio and D.A. Glaser, editors. *Exploring Brain Functions: Models in Neuroscience*. John Wiley and Sons, New York, 1993.
- [59] P. Reinagel and S. Laughlin. Special issue: natural stimulus statistics (editorial). *Network: Computation in Neural Systems*, 12(3), 2000.
- [60] M. J. Wainwright, O. Schwartz, and E. P. Simoncelli. Natural image statistics and divisive normalization: Modeling nonlinearity and adaptation in cortical neurons. In R. Rao, B. Olshausen, and M. Lewicki, editors, *Probabilistic Models of the Brain: Perception and Neural Function*. MIT Press, 2001.
- [61] J. Malo, R. Navarro, I. Epifanio, F. Ferri, and J.M. Artigas. Non-linear invertible representation for joint statistical and perceptual feature decorrelation. *Lecture Notes on Computer Science*, 1876:658–667, 2000.
- [62] J. Malo, J. Gutierrez, I. Epifanio, F. Ferri, and J.M. Artigas. Perceptual feed-back in multigrid motion estimation using an improved DCT quantization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(10):1411–1427, 2001.
- [63] P. Pirsch H.G. Musmann and H.J. Grallert. Advances in picture coding. *Proc. IEEE*, 73(4):523–548, 1985.
- [64] L. Torres and M. Kunt, editors. *Video Coding: a Second Generation Approach*. Kluwer Acad. Publ., Boston, 1996.
- [65] J. Lee. Joint optimization of block size and quantization for quadtree based motion estimation. *IEEE Trans. Im. Proc.*, 7(6):909–912, 1998.
- [66] J.Malo, F.Ferri, J. Albert, and J.M. Artigas. Splitting criterion for hierarchical motion estimation based on perceptual coding. *Electronics Letters*, 34(6):541–543, 1998.

- [67] H. Musmann, H. Hotter, and J. Osterman. Object-oriented analysis-synthesis coding of moving images. *Signal Processing: Image Communication*, 1:117–138, 1989.
- [68] J. Malo, F. Ferri, J. Albert, and J.M. Artigas. Adaptive motion estimation and video vector quantization based on spatio-temporal non-linearities of human perception. In A. Del Bimbo, editor, *Image Analysis and Processing*, volume 1310 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 454–461. Springer Verlag, 1997.
- [69] J. Malo, F. Ferri, J. Albert, and J. Soret. Comparison of perceptually uniform quantization with average perceptual error minimization in image transform coding. *Electronics Letters*, 35(13):1067–1068, 1999.
- [70] J.Malo, F.Ferri, J.Albert, J. Soret, and J.M. Artigas. The role of perceptual contrast non-linearities in image transform quantization. *Image & Vision Computing*, 18(3):233–246, 2000.
- [71] G. M. Schuster and A. K. Katsaggelos. A video compression scheme with optimal bit allocation among segmentation, motion and residual error. *IEE Tr. Im. Proc.*, 6(11):1487–1502, 1997.
- [72] G. M. Schuster and A. K. Katsaggelos. *Rate-distortion based video compression*. Kluwer Acad. Publ., Boston, 1997.
- [73] J. Malo, F. Ferri, J. Gutierrez, and I. Epifanio. The quantizer design may be more important than optimal multigrid motion estimation in video coding. *Electronics Letters*, 36(9):807–809, 2000.
- [74] J. Malo, J. Gutierrez, I. Epifanio, and F. Ferri. Perceptually weighted optical flow for motion-based segmentation in mpeg-4 paradigm. *Electronics Letters*, 36(20):1693–94, 2000.
- [75] B. Julesz. Visual pattern discrimination. *IRE Trans. Info Theory*, 8:84–92, 1962.
- [76] J.A. Cadzow, D.M. Wilkes, R.A. Peters II, and X. Li. Image texture synthesis-by-analysis using moving-average models. *IEEE Trans on Aerospace and Electrical Systems*, 29(4):1110–22, 1993.
- [77] S. Zhu, Y. N. Wu, and D. Mumford. Filters, random fields and maximum entropy (FRAME)-towards the unified theory for texture modeling. In *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 693–696, 1996.
- [78] N. Kingsbury. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 10:234–53, 2001.
- [79] J. Portilla and E. Simoncelli. Image denoising via adjustment of wavelet coefficient magnitude correlation. In *Seventh IEEE Int'l Conf. on Image Proc.*, Vancouver, September 2000.

- [80] R. Molina, A. K. Katsaggelos, J. Mateos, A. Hermoso, and A. Segall. Restoration of severely blurred high range images using stochastic and deterministic relaxation algorithms in compound gauss markov random fields. *Pattern Recognition*, 33(4):555–71, 2000.
- [81] J. Mateos, A. K. Katsaggelos, and R. Molina. A bayesian approach to estimate and transmit regularization parameters for reducing blocking artifacts. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(7):1200–15, 2000.
- [82] J.S. Lee. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Pat. Anal. Mach. Intell.*, 2:165–168, 1980.
- [83] E. P. Simoncelli, W. T. Freeman, E. H. Adelson, and D. J. Heeger. Shiftable multiscale transforms. *IEEE Transactions on Information Theory*, 38:587–607, 1992.
- [84] R.R. Coifman and D.L. Donoho. Translation-invariant de-noising. In A. Antoniadis and G. Oppenheim, editors, *Wavelets and Statistics*. Springer-Verlag, 1995.
- [85] V. Strela. Denoising via block wiener filtering in wavelet domain. In *3rd European Congress of Mathematics*, Barcelona, July 2000. Birkhäuser Verlag.
- [86] M. S. Crouse, R. D. Nowak, and R. G. Baraniuk. Wavelet-based statistical signal processing using hidden markov models. *IEEE Trans. Signal Proc.*, 46:886–902, 1998.
- [87] D Andrews and C Mallows. Scale mixtures of normal distributions. *J. Royal Stat. Soc.*, 36:99–, 1974.
- [88] M. Wainwright, E. P. Simoncelli, and A. Willsky. Random cascades of gaussian scale mixtures for natural images. In *7th IEEE Int'l Conf on Image Processing*, pages 10–13, Vancouver, September 2000.
- [89] W. T. Freeman and E. C. Pastor. Learning low-level vision. In *Int. Conf. Computer Vision*, pages 1182–9, 1999.
- [90] D. G. Albrecht and W. S. Geisler. Motion sensitivity and the contrast-response function of simple cells in the visual cortex. *Visual Neuroscience*, 7:531–546, 1991.
- [91] O. Nestares and D. J. Heeger. Modeling the apparent frequency-specific suppression in simple cell responses. *Vision Research*, 37:1535–43, 1997.
- [92] J. Chamorro-Martínez and J. Martínez Baena and J. Fdez-Valdivia. Decsai-01-03-40. Technical report, Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad de Granada, 2001.

- [93] J. R. Bergen, P. Anandan, K. Hanna, and R. Hingorani. Hierarchical model-based motion estimation. In *Europ. Conf. on Comp. Vision*, pages 237–252, 1992.
- [94] M. Irani and P. Anandan. Robust multi-sensor image alignment. In *International Conf. on Computer Vision*, India, 1998.
- [95] CICYT 1FD 97-0279. Compresión eficiente de vídeo en color mediante el análisis de secuencias basado en modelos y representaciones cromáticas perceptualmente significativas. IP: F.J. Ferri Rabasa.
- [96] CICYT PB98-1374. Definición y búsqueda de patrones visuales en imágenes digitales. Aplicaciones a la distinción de objetos en escenas naturales y a la extracción de rasgos en imágenes biomédicas. IP: J. Fernández Valdivia.
- [97] CICYT-TIC98-0925-CO2-01. El ojo como receptor y procesador de información: desarrollo de nuevas técnicas de medida y simulación del proceso visual. IP: R. Navarro Belsué.
- [98] CICYT 1FD 97-1910. Desarrollo de un sistema de digital local de vídeo comunicación para comunidades residenciales. IP: E. Sanchís.