



VNIVERSITAT D VALÈNCIA
DEPARTAMENT D'ÒPTICA I OPTOMETRÍA
I CIÈNCIES DE LA VISIÓ

FACULTAT DE FÍSICA

PROYECTO DOCENTE

Para acceder al Cuerpo de Catedráticos/as de Universidad

JESÚS MALO LÓPEZ

JULIO, 2018

Código Plaza: **224/2018**, N° Plaza: **6766**

Cuerpo: **Catedráticos/as de Universidad**

Área de Conocimiento: **Óptica** (área propia 648 Optometría y Ciencias de la Visión)

Perfil Docente: **Percepción Visual**

Departamento: **Óptica y Optometría y Ciencias de la visión**

Centro: **Facultad de Física**

Fecha de Resolución: **25 de abril de 2018 (B.O.E. del 10 de mayo de 2018)**

Sobre los (buenos) profesores...

Encara recorde amb emoció com, a les aules d'aquesta Universitat, Joan Fuster ens ensenyava a analitzar els intrincats versos d'Ausiàs March...

Raimón

Ei! (amb accent de la Marina Alta) mai la vida hauria comprat un llibre de poemes d'Ausiàs March si no haugués sentit les cançonetes del Raimón, tot i sent un “cantautor coñazo” que diria Pablo Carbonell.

Anònim

(atribuït a un membre del dept. d'Òptica)

Esto es un láser... uy! zip-coto-clonck!.

Ramón Vilaseca

(zip-coto-clonck! es una onomatopeya que describe el sonido de un láser de He-Ne al resbalar y caer sobre la mesa del profesor de la clase de Técnicas Experimentales II en 1991).

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 dept. de Óptica)

Sobre la epistemología en neurociencia visual, y en general...

The psychophysics is the spectroscopy of the brain

Jack D. Cowan

(frase citada por Stephanie Palmer, postdoc de Jack, en una charla sobre la transmisión de información en la retina de la salamandra, donde, como buena física, utilizaba la letra S de la termodinámica para denotar la entropía en lugar de la H de los ingenieros)

What I cannot create I do not understand

Richard Feynman

(epitafio en la pizarra de su despacho de Caltech)

Es normal que nuestros estudiantes no pillen la metáfora de Cowan porque no les hemos de explicar “bien” lo que es la espectroscopía. El problema es que, después de pasar por nuestras manos y recibir un título, no estoy seguro de que pillen la de Feynman. Corregir esta incapacidad para las metáforas es algo muy serio pero no es obvio como incluirlo en el próximo listado de competencias sometido a la ANECA.

Anónimo

(atribuido a un miembro del dept. de Óptica)

Índice general

1. Introducción	1
2. La Percepción Visual: Concepto e Implementación	3
2.1. La Percepción Visual: concepto	4
2.2. La Percepción Visual: implementación en la Universitat de València	7
2.2.1. Características generales del título	8
2.2.2. Objetivos generales del título	8
2.2.3. Caracter de la formación	8
2.2.4. Competencias básicas y generales	8
2.2.5. Competencias específicas	9
2.2.6. Descripción de los módulos	13
3. Justificación e incardinación	17
3.1. Descripción de las asignaturas propuestas	18
3.1.1. Mecanismos y modelos de la visión	18
3.1.2. Visión de Formas y Color	19
3.2. Relación con asignaturas previas	20
3.3. Influencia en otras asignaturas	25
3.4. Centralidad de “Mecanismos y Modelos de la Visión”	28
4. Software de uso docente	31
4.1. Colorlab: colorimetría triestímulo y visión del color en Matlab . . .	33
4.2. Vistalab: modelos de visión espacio-temporal en Matlab	34
5. Guía docente de “Mecanismos y Modelos de la Visión”	37
5.1. Datos identificativos	37
5.2. Resumen	37
5.3. Objetivos generales	37
5.4. Destrezas	38
5.5. Conocimientos previos	38
5.6. Temario y planificación temporal	38
5.7. Bibliografía	51
5.8. Volumen de trabajo	53
5.9. Metodología Docente	53
5.10. Evaluación	54

6. Guía docente de “Visión de Formas y Color”	57
6.1. Datos identificativos	57
6.2. Resumen	57
6.3. Objetivos generales	58
6.4. Destrezas	58
6.5. Conocimientos previos	58
6.6. Temario y planificacion temporal	58
6.7. Bibliografía	66
6.8. Volumen de trabajo	67
6.9. Metodología docente	67
6.10. Evaluación	68
A. Enseñar ciencias en una titulación (aparentemente) no científica	69
A.1. La Percepción Visual y tres definiciones (discutibles) de Ciencia . . .	69
A.2. El problema fundamental	71
A.3. Algunos problemas asociados	71
A.4. Consecuencias	72
A.5. ¿Qué opciones nos quedan?	72
A.6. Objetivo de este proyecto docente	74
A.7. ¿Qué pasa si se fracasa en el intento?	74
A.8. Nota aclaratoria	75
B. Proyecto de Investigación	77
B.1. Resumen	77
B.2. Origen del equipo de investigación	78
B.3. Modelización actual del cerebro visual	79
B.3.1. Consideraciones generales	79
B.3.2. Algunos problemas aplicados	80
B.4. Limitación de los enfoques actuales	84
B.5. Alternativas que proponemos	87
B.6. Hipótesis y Objetivos científicos	92
Referencias	94

Capítulo 1

Introducción

Con fecha 25 de abril de 2018 (Resolución 6260 del B.O.E de 10 de mayo de 2018) la Universitat de València Estudi General (UVEG en adelante) convocó a concurso de acceso, entre otras, una plaza del cuerpo docente de Catedrático/a de Universidad en el Área de Conocimiento de Óptica (área propia de Optometría y Ciencias de la Visión), plaza nº 6766 con código 224 / 2018, adscrita al Departamento de Óptica y Optometría y Ciencias de la Visión de la Facultad de Física, con perfil docente *Percepción Visual*, y perfil lingüístico para impartir docencia en catalán.

De acuerdo con el Real Decreto 1313/2007 de 5 de octubre (B.O.E de 8 de octubre de 2007) por el que se regula el régimen de los concursos de acceso a cuerpos docentes universitarios y el «Reglamento de selección de personal docente e investigadora de la UVEG», en sus apartados 6.1 y 7.1, la citada Convocatoria establece que,

[...] En el acto de presentación, que será público, [las personas concursantes] entregarán al presidente o presidenta de la comisión cinco ejemplares de su historial académico, docente, investigador y de gestión (Anexo III), así como un ejemplar de las publicaciones y documentos acreditativos de los méritos y cinco ejemplares del proyecto docente (guía docente y justificación e incardinación de la asignatura dentro del plan de estudios).

[...] En caso de que la convocatoria exprese un perfil docente el proyecto habrá de ajustarse al mismo.

Atendiendo a estas indicaciones, este documento recoge el Proyecto Docente que presento para concursar a la plaza mencionada. Dado que la convocatoria establece el perfil docente *Percepción Visual*, y dado que en la resolución de 12 de diciembre de 2011 de la UVEG, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Óptica y Optometría (BOE del 30 de diciembre de 2011, Sec. III pag. 146551), la materia ***Percepción Visual*** consta de diferentes asignaturas de carácter obligatorio y optativo, en el Proyecto Docente que presento, he seleccionado como representativas, dos de dichas asignaturas:

- ***Mecanismos y Modelos de la Visión***, de carácter obligatorio (3er. curso).
- ***Visión de Formas y Color***, de carácter optativo (4o. curso).

Así pues, el presente Proyecto comienza con una descripción de la implementación del estudio de la *Percepción Visual* en el *Grado en Óptica y Optometría de la Universitat de València*, planteando primero unas consideraciones generales sobre el concepto de Percepción Visual y siguiendo con la descripción de la estructura del Plan de Estudios. Posteriormente situaré y justificaré las asignaturas objeto de este Proyecto Docente estableciendo brevemente interdependencias con otras asignaturas del Plan. A continuación haré una pequeña reflexión sobre la innovación docente en esta materia. Por último, el Proyecto finaliza con la proposición de una guía docente para la impartición de cada una de estas dos asignaturas.

Como información complementaria, para enfatizar la relación existente entre mi docencia en *Percepción Visual* y la actividad investigadora que desarrollo, en el apéndice titulado *Proyecto de Investigación* incluyo un resumen del recién concedido proyecto MINECO del que soy Investigador Principal, *Deep Networks in the Visual Brain: from Measurements to Algorithms*, con referencia DPI2017-89867. Como puede verse en dicho apéndice la investigación que he venido realizando es totalmente consistente con la docencia. Esperemos que las condiciones económicas permitan la continuidad de este fructífero paralelismo 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 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 materia docente a la que se refiere la convocatoria de la plaza objeto de este concurso es *Percepción Visual*. Este capítulo está dedicado a delimitar el cuerpo de conocimientos englobados en esa categoría según la opinión aceptada por las comunidades de Ciencias de la Visión y de Neurociencia Visual.

El objetivo básico de las asignaturas englobadas en la materia Percepción Visual 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, aquí, en primer lugar se describirán brevemente los límites y el estado del arte de los conocimientos comunmente aceptados sobre dicha categoría genérica. Esta concepción estándar es el referente en el que deberíamos basarnos para elegir los contenidos que deben cubrir las asignaturas de la materia denominada Percepción Visual en nuestro Plan de Estudios particular.

Una vez descrita la concepción estándar de la materia genérica (el concepto de Percepción Visual), a continuación se indica su implementación particular en la Universitat de València: se describe la estructura de la titulación y las competencias específicas relacionadas con la Percepción Visual. De esta manera preparamos el camino para tratar en el capítulo siguiente la justificación de las asignaturas objeto del presente Proyecto Docente y su incardinación en el Plan de Estudios.

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 del Grado de Óptica y Optometría 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 tienen un efecto visible y 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: (a) la formación de imágenes (objeto de la *Óptica Fisiológica*, abordada por varias asignaturas de la titulación), (b) los relacionados con la descripción anatómica de la fisiología (ya que estos aspectos *no funcionales* se tratan en *Biología Ocular*, *Anatomía Humana y Ocular*, y *Fisiología Humana y Ocular*), y (c) restringir el estudio a tareas perceptuales de bajo nivel de abstracción, debido a que los aspectos *cognitivos* de un mayor nivel de abstracción serían objeto de otras ramas de la neurociencia y la psicología y quedarían fuera del ámbito de este Grado en Óptica y Optometría.

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, el movimiento y la profundidad), 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.**

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

La concepción estándar de la materia que consideramos aquí incluye aspectos *psicofísicos, fisiológicos y computacionales*, como recogen los excelentes textos de Brian Wandell (*Foundations of Vision* [1]), o John Werner y Leo Chalupa (*The New Visual Neurosciences* [2]). Los elementos del *modelo estándar* generalmente

aceptado son los siguientes:

- Las señales (imágenes) procedentes del mosaico retiniano de fotodetectores con sensibilidades espectrales sintonizadas a largas, medias y cortas longitudes de onda (L,M,S) son analizadas por tres mecanismos abstractos: el canal acromático y los canales cromáticos oponentes rojo-verde (R-G) y amarillo-azul (Y-B) [3–5].
- 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) [6–9]. 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 [10–14].
- En primera aproximación el comportamiento de dichos mecanismos es lineal y efectúan una reducción de la anchura de banda global de la señal [15–18].
- 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 [14, 19–22].
- A partir de la salida de los filtros pasa-banda espacio-temporal puede calcularse el movimiento 2D en la imagen retiniana [10–14].
- De manera matemáticamente equivalente al cálculo del campo de vectores desplazamiento (o velocidad) citado arriba, neuronas pasa-banda similares permiten el cálculo de campos de disparidad binocular [23–25].
- La resolución en el dominio de respuestas tras la etapa no lineal es uniforme, luego es no uniforme en el dominio espacio-temporal original [26–29].
- 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 [29–31].
- 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 [1, 4, 5, 32].
- 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 [5, 33–35].

- La resolución en el dominio de respuestas tras la no linealidad es uniforme, luego es no uniforme en el dominio triestímulo [5, 36, 37].

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, ρ_λ , y radiancias s_λ), 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* [5]) 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 . Considerando interacciones binoculares esta transformación lineal permite el cálculo de disparidades. 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 [4, 6, 7, 19, 20, 22, 38–41] y de análisis teóricos basados en la organización que deben tomar los detectores para un análisis óptimo de la información contenida en las imágenes naturales. Esta última es la llamada *interpretación ecológica* del funcionamiento del sistema visual [42–48].

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 [38, 44, 49], el análisis espacio-temporal de la señal hecho por los mecanismos psicofísicos [8], y la colorimetría triestímulo [5, 32]. Sin olvidar (aunque forme parte de la *Óptica Fisiológica*) la importancia de los sistemas lineales para caracterizar el comportamiento de la óptica [50].
- 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, el movimiento y la profundidad, 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.

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

La estructura básica del Plan de Estudios del Grado en Óptica y Optometría de esta Universidad se ajusta a lo establecido en el Real Decreto 1393/2007 (B.O.E. de 30 de octubre de 2007), que establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, como viene reflejado en el texto que describe su aprobación (Resolución de 12 de diciembre de 2011, de la UVEG, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Óptica y Optometría, B.O.E. 30 de diciembre de 2011, N° 314, Sec. III, pag. 146551)

De acuerdo con esto, está constituido por bloques de materias con cuatro caracteres: Formación Básica, Formación Obligatoria, Optatividad y Prácticas Externas / Trabajo de Fin de Grado. Además, cada materia de estos bloques está integrada por asignaturas, que constituyen las unidades de matrícula.

A continuación se presenta un breve resumen de los principales aspectos organizativos del Plan de Estudios del «Grado en Óptica y Optometría por la UVEG».

2.2.1. Características generales del título

Denominación del Título	Grado en Óptica y Optometría
Centro donde se imparte	Facultat de Física de la UVEG
Tipo de enseñanza	Presencial
Rama de conocimiento	Ciencias de la Salud
Créditos ECTS	240
Número de plazas de nuevo ingreso	50
Número de cursos	4
Lenguas utilizadas en la formación	Castellano y Catalán

2.2.2. Objetivos generales del título

El objetivo fundamental de la titulación (extraído de la Memoria de Verificación aprobada por ANECA) es formar especialistas en Óptica y Optometría altamente cualificados para el cuidado de la salud visual mediante el desarrollo de actividades dirigidas a la prevención, detección, evaluación y tratamiento de las alteraciones de la visión, que den respuesta a las demandas de la sociedad. Para ello adquirirán conocimientos, habilidades y destrezas en la realización de exámenes visuales y oculares, diseño, verificación y adaptación de sistemas ópticos, diseño y desarrollo de programas de entrenamiento visual y diseño y propuestas de mejoras ergonómicas.

2.2.3. Distribucion del plan de estudios por el carácter de la formación

Carácter de la Materia	ECTS
Formación Básica	60
Obligatorias	132
Optativas	24
Prácticas externas (obligatorias)	18
Trabajo Fin de Grado (obligatorio)	6
Créditos totales	240

2.2.4. Competencias básicas y generales

Transcribo a continuación las competencias de ambos tipos tal como están recogidas en la Memoria de Verificación aprobada por ANECA.

- CB1** Que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.

- CB2** Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio.
- CB3** Que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.
- CB4** Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
- CB5** Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.
- CG1** Poseer y comprender los fundamentos de la Optometría para su correcta aplicación clínica y asistencial.
- CG2** Saber aplicar los conocimientos adquiridos a la actividad profesional, saber resolver problemas y elaborar y defender argumentos.
- CG3** Ser capaz de reunir e interpretar datos relevantes para emitir juicios.
- CG4** Ser capaz de transmitir información, ideas, problemas y soluciones tanto a un público especializado como no especializado.
- CG5** Desarrollo de habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un elevado grado de autonomía.
- CG6** Conocer la legislación aplicable en el ejercicio profesional, con especial atención a las materias de de igualdad de género entre hombre y mujeres, derechos humanos, solidaridad, sostenibilidad, protección del medio ambiente y fomento de la cultura de la paz.

2.2.5. Competencias específicas

Del exhaustivo listado de 199 competencias específicas existente en la Memoria de Verificación aprobada por ANECA, reproduzco aquí solamente las relacionadas con las asignaturas consideradas en este Proyecto Docente de acuerdo con estos criterios,

1. Corresponden estrictamente con la materia que nos ocupa, ya sea en el módulo de Óptica (Percepción Visual II), en el módulo de Optometría (Percepción Visual I), o en el módulo de Optatividad (Percepción Visual: Mecanismos y Aplicaciones Clínicas).
2. Tienen relación con la materia que nos ocupa, ya sea como antecedente conveniente para el estudio de las asignaturas presentadas en este Proyecto Docente, o debido a que las asignaturas presentadas cubren conocimientos de utilidad para otras asignaturas de otras materias.

3. Son competencias tan transversales que de algún modo se hace referencia a ellas en cualquier asignatura.

Las distintas competencias, salvo las totalmente transversales, se han coloreado de acuerdo a las asignaturas a las que están asociadas según el siguiente código de color (que también coincide con el de las tablas que describen los módulos de la titulación que figuran en la siguiente subsección):

- Matemáticas
- Bioestadística
- Óptica física
- Psicofísica de la visión
- Mecanismos y Modelos de la Visión
- Visión de Formas y Color
- Vision de Movimiento y Profundidad
- Métodos de exploración clínica
- Métodos de psicofísicos de detección y seguimiento de patologías visuales
- Registro y procesado de imágenes clínicas

De acuerdo con los criterios citados arriba, en el caso de asignaturas de materias ajenas a la Percepción Visual, se han listado solamente las competencias que están relacionadas con la materia que nos ocupa. No se listan aquí las competencias a adquirir en Biología Ocular, Anatomía Ocular, y Fisiología Ocular debido a que, desgraciadamente, no incluyen descripciones *funcionales* de las vías visuales y por tanto no son útiles para los aspectos tratados en Percepción Visual. Finalmente, nótese que puntualmente alguna de las competencias se halla duplicada: quizá se trata de una errata, o de una voluntad explícita del *legislador* de enfatizar conceptos que se comparten en diferentes asignaturas.

En resumen, *en número de competencias*, la materia “Percepción Visual” representa el 20 % de la titulación, y si consideramos además las competencias correspondientes a los antecedentes cuantitativos y a las consecuencias en otras materias, el 30 % está muy ligado a esta materia. Según el código de color citado arriba, tenemos:

- | | |
|-------------|--|
| CE10 | Situar la información nueva y la interpretación de la misma en su contexto. |
| CE12 | Demostrar e implementar métodos de análisis crítico, desarrollo de teorías y su aplicación al campo disciplinar de la Optometría. |
| CE15 | Demostrar capacidad para participar de forma efectiva en grupos de trabajo unidisciplinares y multidisciplinarios en proyectos relacionados con la Optometría. |
| CE18 | Conocer, valorar y aplicar en el ámbito científico y profesional una perspectiva de género. |

- CE26** Conocer y manejar material y técnicas de laboratorio.
- CE27** Demostrar conocimientos básicos de geometría y análisis matemático.
- CE28** Conocer los números complejos, vectores y matrices.
- CE29** Conocer los principios del análisis de funciones.
- CE30** Conocer los elementos del cálculo de derivadas e integrales.
- CE31** Aplicar los métodos generales de la Estadística a la Optometría y Ciencias de la Visión.
- CE32** Saber discriminar los objetivos de un análisis estadístico: puramente descriptivo e inferencial.
- CE33** Conocer los principios y aplicaciones de los contrastes o test de hipótesis estadísticos.
- CE33** Conocer los principios generales de los modelos probabilísticos y en particular de los modelos de regresión y análisis de la varianza.
- CE66** Conocer el principio de formación de imágenes y las propiedades de los sistemas ópticos.
- CE68** Conocer los fenómenos característicos de la naturaleza ondulatoria de la luz, como son las interferencias, la difracción y la polarización.
- CE72** Conocer los fundamentos de las leyes radiométricas y fotométricas.
- CE73** Reconocer el ojo como sistema óptico.
- CE74** Conocer los parámetros y los modelos oculares.
- CE75** Comprender los factores que limitan la calidad de la imagen retiniana.
- CE77** Ser capaz de realizar pruebas psicofísicas para determinar los niveles de percepción visual.
- CE78** **Conocer los modelos básicos de visión.**
- CE79** Estudiar las aplicaciones de la radiometría y fotometría ocular.
- CE80** Conocer los mecanismos sensoriales y motrices de la visión binocular.
- CE81** Ser capaz de desarrollar destrezas en la evaluación e interpretación de información de datos psicofísicos.
- CE82** Ser capaz de reconocer e implementar buenas prácticas científicas de medida y experimentación en psicofísica.
- CE83** Ser capaz de realizar pruebas psicofísicas para determinar los niveles de percepción visual.
- CE84** Conocer el funcionamiento de la retina como receptor de energía.

- CE85** Conocer los aspectos espaciales y temporales de la visión.
- CE86** Saber correlacionar los experimentos psicofísicos con la fisiología del sistema visual.
- CE87** Conocer y aplicar la teoría de Fourier a los modelos de visión.
- CE88** Ser capaz de medir e interpretar los datos psicofísicos obtenidos en la evaluación de la percepción visual. Adquirir las habilidades clínicas necesarias para el examen y tratamiento de pacientes.
- CE89** Conocer los modelos básicos de visión del color, forma y movimiento.
- CE90** Conocer los aspectos cromáticos espaciales y temporales de la visión.
- CE91** Conocer las modificaciones ligadas al envejecimiento en los procesos perceptivos.
- CE92** Conocer los modelos básicos de visión.
- CE93** Conocer los aspectos espaciales y temporales de la visión.
- CE94** Saber correlacionar los experimentos psicofísicos con la fisiología del sistema visual.
- CE95** Conocer y aplicar la teoría de Fourier a los modelos de visión.
- CE96** Conocer los modelos básicos de visión del color, forma y movimiento.
- CE97** Conocer los aspectos cromáticos espaciales y temporales de la visión.
- C151** Conocer algunas de las técnicas psicofísicas más habituales en la práctica clínica.
- CE152** Aplicar técnicas psicofísicas estándar para caracterizar sistemas visuales anómalos.
- CE153** Conocer los fundamentos de los instrumentos de última generación para diagnóstico de patologías oculares.
- CE154** Adquirir habilidades básicas para el manejo de instrumental especializado.
- CE155** Saber interpretar los resultados de las medidas realizadas.
- CE158** Adquirir habilidades básicas para el manejo de instrumental fotográfico y de vídeo.
- CE159** Conocer los elementos básicos del tratamiento óptico y digital de imágenes.
- CE165** Conocer como se adapta el sistema visual al nivel de iluminación y a la cromaticidad de la luz.

- CE166** Conocer como se adapta el sistema visual al contenido frecuencial (espacio-temporal) de escenas complejas.
- CE167** Conocer la arquitectura y función de las áreas del cortex extra-estriado con participación relevante en la percepción visual, así como sus interacciones.
- CE168** Conocer la forma en la que se integra la información de las diversas dimensiones perceptuales para la realización de juicios sobre la escena.
- CE169** Conocer y manejar modelos avanzados de visión (no lineales y/o integrados por elementos pertenecientes al córtex extra estriado).
- CE170** Saber diseñar e implementar tests psicofísicos para el diagnóstico de alteraciones del sistema visual.
- CE171** Saber analizar y discutir las implicaciones diagnósticas de los resultados de un experimento psicofísico.
- CE172** Conocer y aplicar los procedimientos e indicaciones de los diferentes métodos psicofísicos de exploración clínica y las técnicas diagnósticas complementarias.
- CE173** Saber seleccionar el test más adecuado para cada paciente y patología particular.
- CE185** Conocer las últimas investigaciones en los campos de la Óptica, Optometría y Ciencias de la Visión.

2.2.6. Descripción de los módulos de los que consta el plan de estudios

En este apartado se indican las materias y asignaturas que integran cada uno de los módulos del Plan de Estudios tal como están definidos en el B.O.E. del 30 de diciembre de 2011.

Se encuentran resaltadas tanto las asignaturas presentadas en este Proyecto Docente, como las asignaturas relacionadas según los criterios referidos en el apartado anterior.

En número de créditos, las asignaturas correspondientes a la materia Percepción Visual representan entorno al 15 % de la titulación, llegándose al 25 % si consideramos los antecedentes cuantitativos y las consecuencias en otras asignaturas. Es de destacar que en estos balances no incluyo las asignaturas básicas relacionadas con la fisiología visual (24 créditos, o el 10 % de la titulación) porque no describen las vías visuales neuronales que es el sustrato que explica la fenomenología psicofísica.

Es importante reseñar que, en la implantación del Plan de Estudios, además de las tradicionales clases teóricas, teórico-prácticas de problemas y las sesiones de laboratorio, se han incluido en múltiples asignaturas sesiones de resolución de problemas en grupos reducidos, más centradas en el trabajo del alumnado y su seguimiento

Módulo: Formación Básica

Materias	Asignaturas	Carácter	ECTS	Curso
Física.	Física I. Física para las ciencias de la salud.	Formación Básica.	6	1.º
	Física II. Óptica geométrica.	Formación Básica.	6	1.º
Matemáticas.	Matemáticas.	Formación Básica.	6	1.º
	Bioestadística.	Formación Básica.	6	1.º
Biología.	Biología ocular.	Formación Básica.	6	1.º
Anatomía humana.	Anatomía humana y ocular.	Formación Básica.	9	1.º
Fisiología.	Fisiología humana y ocular.	Formación Básica.	9	1.º
Química.	Materiales ópticos.	Formación Básica.	6	1.º
Óptica fisiológica.	Óptica fisiológica.	Obligatorio.	6	1.º
Psicología.	Psicología. Atención al paciente.	Formación Básica.	6	2.º
Créditos totales			66	

Módulo: Óptica

Materias	Asignaturas	Carácter	ECTS	Curso
Óptica.	Instrumentos ópticos y optométricos.	Obligatorio.	12	2.º
	Óptica física.	Obligatorio.	6	3.º
Óptica oftálmica.	Óptica oftálmica.	Obligatorio.	9	2.º
	Montaje y adaptación de lentes oftálmicas.	Obligatorio.	9	3.º
Percepción visual II.	Mecanismos y modelos de la visión.	Obligatorio.	6	3.º
Créditos totales			42	

Módulo: Optometría

Materias	Asignaturas	Carácter	ECTS	Curso
Percepción visual I.	Psicofísica de la visión.	Obligatorio.	9	2.º
Optometría.	Optometría I.	Obligatorio.	4,5	2.º
	Prácticas de optometría I.	Obligatorio.	6	2.º
	Optometría II.	Obligatorio.	4,5	2.º
	Prácticas de optometría II.	Obligatorio.	7,5	3.º
	Optometría III.	Obligatorio.	4,5	3.º
	Optometría pediátrica.	Obligatorio.	4,5	3.º
	Optometría geriátrica y legislación sanitaria.	Obligatorio.	7,5	4.º
Contactología.	Contactología.	Obligatorio.	6	3.º
	Prácticas de contactología.	Obligatorio.	7,5	3.º
	Contactología II.	Obligatorio.	4,5	3.º
Créditos totales			66	

de los contenidos. Estas clases están concebidas para realizar un seguimiento de la capacidad de resolución de problemas por parte del alumnado, resolver las dudas

Módulo: Patología del Sistema Visual

Materias	Asignaturas	Carácter	ECTS	Curso
Patología y Farmacología Ocular.	Patología y Farmacología Ocular.	Obligatorio.	9	2.º
	Anomalías de la visión binocular.	Obligatorio.	4,5	3.º
	Métodos de exploración clínica.	Obligatorio.	4,5	4.º
Créditos totales			18	

Módulo: Optatividad

Materia	Asignatura	Carácter	ECTS	Curso
Óptica biomédica.	Registro y procesamiento de imágenes clínicas.	Optativo.	6	4.º
	El láser y sus aplicaciones clínicas.	Optativo.	4,5	4.º
	Diseño óptico asistido por ordenador.	Optativo.	4,5	4.º
Percepción visual: mecanismos y aplicaciones clínicas.	Visión de formas y color.	Optativo.	4,5	4.º
	Visión del movimiento y la profundidad.	Optativo.	4,5	4.º
	Métodos psicofísicos para la detección y seguimiento de patologías visuales.	Optativo.	6	4.º
Optometría avanzada.	Baja visión, ortóptica y terapia visual.	Optativo.	6	4.º
	Técnicas avanzadas de manejo de la prescripción.	Optativo.	9	4.º
	Temas actuales de óptica y optometría.	Optativo.	4,5	4.º
Créditos totales			49,5	

Módulo: Prácticas Externas y Trabajo Fin de Grado

Materias	Asignaturas	Carácter	ECTS	Curso
Prácticas externas.	Prácticas externas.	Obligatorio.	18	4.º
Trabajo fin de grado.	Trabajo fin de grado.	Obligatorio.	6	4.º
Créditos totales			24	

surgidas al enfrentarse a éstos y a los conceptos teóricos o aclarar aspectos en los que se encuentran mayores dificultades. En definitiva, se trata de verificar el progreso del alumnado en la materia asociando una componente de evaluación continua a este seguimiento. Los laboratorios relacionados con la Percepción Visual siempre se han desarrollado en unas condiciones en las que es posible una interacción y un diálogo adecuado entre docente y estudiante.

Por último, para la planificación de las actividades docentes se ha de tener en cuenta que, en este Plan, la actividad presencial del estudiante en cada asignatura ha de suponer, como máximo, el 40 % de su carga horaria total, y que se ha empleado una equivalencia de 25 horas lectivas por crédito ECTS.

Capítulo 3

Justificación e incardinación de las asignaturas propuestas en el Plan de Estudios

En este capítulo estableceré brevemente la justificación e interrelaciones de las asignaturas objeto de este Proyecto y el resto de las que componen el Plan de Estudios. Cabe destacar, que la materia *Percepción Visual* ha tenido siempre un papel de peso en los estudios de Óptica y Optometría de la UVEG en consonancia con lo que ocurre en el mundo anglosajón en relación con la Neurociencia Visual¹, quizá por la tradición heredada de los promotores originales del título en Valencia². Las asignaturas elegidas, tal y como se ha sugerido en el capítulo anterior, son representativas de la *Percepción Visual* en el módulo Óptica (obligatorio), y en el módulo de Optatividad.

Podemos establecer que las asignaturas “*Mecanismos y Modelos de la Visión*”, y “*Visión de Formas y Color*” en las que he decidido centrar mi Proyecto Docente tienen específicamente, las siguientes características:

- Se imparten en el 3^{er} y el 4^o curso del Grado (6^o y 7^o cuatrimestre respectivamente), por lo que es de suponer que el alumnado es portador de un *cierto* grado de formación en Matemáticas. Ese (poco o mucho) nivel debe marcar el grado de formalización y la complejidad de las situaciones a analizar en el proceso de enseñanza de estas asignaturas.
- *Mecanismos y Modelos de la Visión* es de carácter obligatorio y, por tanto, todo el alumnado de la titulación ha de cursarla independientemente de su orientación optativa posterior. Esto determina que los aspectos que se consideren básicos no deberían relegarse para ser cubiertos en asignaturas posteriores.

¹Personal Comm. Prof. Sarah J. Waugh and Dr. Jan Skerswetat (Optometry School, Anglia Univ. Cambridge, UK), Prof. Bruno Olshausen and Prof. Stanley Klein (Optometry School of Berkeley Univ., USA)

²Estancias del Prof. José María Artigas y la Dra. Adelina Felipe en Cambridge Univ. en los 80.

- La asignatura *Visión de Formas y Color* es de carácter optativo. Esto implica que es posible adoptar estrategias docentes más arriesgadas dado el reducido número de alumnos que cursan esta asignatura.
- Por último, ambas asignaturas presentar deben guardar una continuidad tanto con asignaturas previas de carácter obligatorio correspondientes a la misma materia Percepción Visual (p.ej. la asignatura Psicofísica -en el módulo obligatorio de Optometría-), como con otras asignaturas optativas también de esta materia (como son, Visión de Movimiento y Profundidad, y Métodos Psicofísicos para la Detección y el Seguimiento de Patologías Visuales). Es por ello responsabilidad de los docentes en Percepción Visual la difícil tarea de hacer que la materia sea simultáneamente atractiva frente a otras optativas a la par que rigurosa para la generación de futuros graduados/as interesados/as en desarrollar una carrera investigadora en este campo multidisciplinar.

En el punto 3.4 *Centralidad de “Mecanismos y Modelos de la Visión”* expongo el carácter fundamental de esta asignatura obligatoria para la materia Percepción Visual y por tanto núcleo de este Proyecto Docente. No obstante, antes de efectuar dichas consideraciones personales, para establecer de forma más precisa las relaciones de las asignaturas elegidas con los contenidos del resto de las asignaturas del Plan de Estudios, transcribo a continuación los contenidos de las asignaturas propuestas desde el documento oficial que recoge dicho Plan: la Memoria de Verificación del Grado.

3.1. Descripción de las asignaturas propuestas

3.1.1. Mecanismos y modelos de la visión

Dentro del módulo de Óptica, esta es la única asignatura de la materia obligatoria Percepción Visual II, contando con 6 créditos ECTS (4.5 de teoría y seminarios, y 1.5 correspondiente a laboratorio). Se imparte en el 6º cuatrimestre.

Contenidos: Arquitectura retina-córtex. Caracterización lineal (espectral, espacial y temporal) de los mecanismos neuronales de la visión. Campos receptivos en la retina, LGN, V1 y MT. Mecanismos fisiológicos y modelos lineales de la visión del color. Análisis de la respuesta de un conjunto de sensores lineales en el dominio de Fourier. Filtros globales y sensores pasa-banda. Correlación entre las CSFs espaciales psicofísicas y las respuestas en frecuencia de los sensores de V1. Detección lineal de texturas y patrones espaciales en V1. Cálculo de flujo óptico a partir de la respuesta lineal de V1 y MT.

Competencias básicas y generales: En este punto la Memoria de Verificación recoge las competencias CG1-CG6 citadas en el capítulo anterior.

Competencias específicas: En este punto la Memoria de Verificación recoge las competencias **CE92-CE97** citadas en el capítulo anterior en sintonía con los contenidos referidos. Estos contenidos también refuerzan las competencias **CE78**,

CE85, **CE87**, **CE89**, y **CE90** que empezaron a introducirse en Psicofísica de la Visión.

Actividades Formativas	Horas	Presencialidad (%)
Sesiones teóricas de grupo reducido	15	100
Clases teórico-prácticas	30	100
Sesiones de Laboratorio	15	100
Estudio de fundamentos teóricos	45	0
Desarrollo de trabajos y cuestiones	40	0
Tutorías individuales	5	0
TOTAL (trabajo presencial + autónomo)	150	

Metodologías docentes: Tanto en esta asignatura como en la siguiente, el Documento de Verificación recoge las siguientes metodologías: Trabajo en grupo del estudiante; Metodologías audiovisuales; Ejercicios de aplicación práctica de los contenidos teóricos; Interactividad del grupo a través de exposiciones orales; Impartición de los contenidos teóricos de la materia. Todas ellas se usan en ambas asignaturas.

En el capítulo dedicado a la guía docente se dibuja la aproximación metodológica que propongo para esta asignatura obligatoria: con un reparto de carga sesgado hacia la *clase magistral*, laboratorios basados en experimentos de carácter *cerrado* y seminarios con ejercicios y simulaciones *dirigidas* por parte del profesor. Esta aproximación más tradicional contrasta con la que he venido aplicando en la asignatura optativa *Visión de Formas y Color* proponiendo ejercicios de carácter *abierto* utilizando las herramientas computacionales descritas en el capítulo siguiente, y un sesgo hacia las sesiones donde el estudiante trabaja de forma autónoma.

3.1.2. Visión de Formas y Color

Esta es una de las asignaturas de la materia Percepción Visual: Mecanismos y Aplicaciones Clínicas que está dentro del módulo Optatividad, y cuenta con 4.5 créditos ECTS (4 de teoría y seminarios, y 0.5 correspondiente a laboratorio). Se imparte en el 7º cuatrimestre.

Contenidos: Vectores de características y clasificación. No-linealidades en los conos y el LGN. Mecanismos de adaptación a la luz (blanqueo, cambios en la respuesta no-lineal). Mecanismos de adaptación e inducción cromática. Mecanismos de la visión del color en V1 (células oponentes dobles). Propiedades de V4 y su influencia en la constancia del color. Modelos fisiológicos no-lineales y modelos de apariencia del color. Acromatopsias. Adaptación al contraste. Control de ganancia de contraste en los sensores acromáticos de V1. Descripción de texturas con invariancia al contraste e iluminación. Descripción de formas a partir de sensores de bordes. Integración de contornos. Agnosias relacionadas con la visión de formas. Mecanismos neuronales en IT sintonizados a objetos.

Competencias básicas y generales: En este punto la Memoria de Verificación recoge las competencias CG1-CG6 citadas en el capítulo anterior.

Competencias específicas: La Memoria de Verificación recoge las competencias **CE165-CE169** citadas en el capítulo anterior en correspondencia con los contenidos referidos.

Actividades formativas: En este caso el documento oficial da los datos agregados para todas las asignaturas del módulo Optatividad. Recogemos aquí los datos correspondientes a esta asignatura aislada, cuyo total corresponde a la parte proporcional de los créditos ECTS del módulo, y la distribución que se muestra es la que venimos aplicando desde su implantación.

Actividades Formativas	Horas	Presencialidad (%)
Sesiones teóricas de grupos reducidos (seminarios con demos teórico-prácticas)	5	100
Clases teórico-prácticas (introducción a los ejercicios)	15	100
Clases prácticas (trabajo tutelado en aula de informática)	25	100
Estudio de fundamentos teóricos	15	0
Ejecución de los ejercicios	45	0
Tutorías individuales y colectivas	7	0
TOTAL (trabajo presencial + autónomo)	112	

Metodologías docentes: Como se pone de manifiesto por el reparto de las cargas de trabajo y la organización temporal propuesta en el capítulo dedicado a la Guía Docente de esta asignatura optativa, la exposición de los contenidos se organiza entorno a la resolución de seis ejercicios de carácter *abierto*. Estos ejercicios, que cuentan con diferentes variantes que son abordadas por distintos grupos de la clase, son discutidos con los estudiantes y resueltos en sesiones tuteladas en las que aprenden a hacer simulaciones con los elementos de los modelos de Percepción Visual que hemos desarrollado en Matlab: **Colorlab** y **Vistalab**.

La Figura 3.1 muestra gráficamente sobre un diagrama temporal el conjunto de relaciones entre las asignaturas propuestas en este Proyecto Docente y otras asignaturas del Grado.

3.2. Relación con asignaturas previas

Las asignaturas presentadas en este Proyecto Docente tienen un carácter netamente multidisciplinar porque refiriéndose a fenómenos esencialmente biológicos, se abordan desde una perspectiva cuantitativa. Por tanto, los antecedentes convenientes para cursarlas incluyen tanto (a) los aspectos matemáticos y la capacidad de

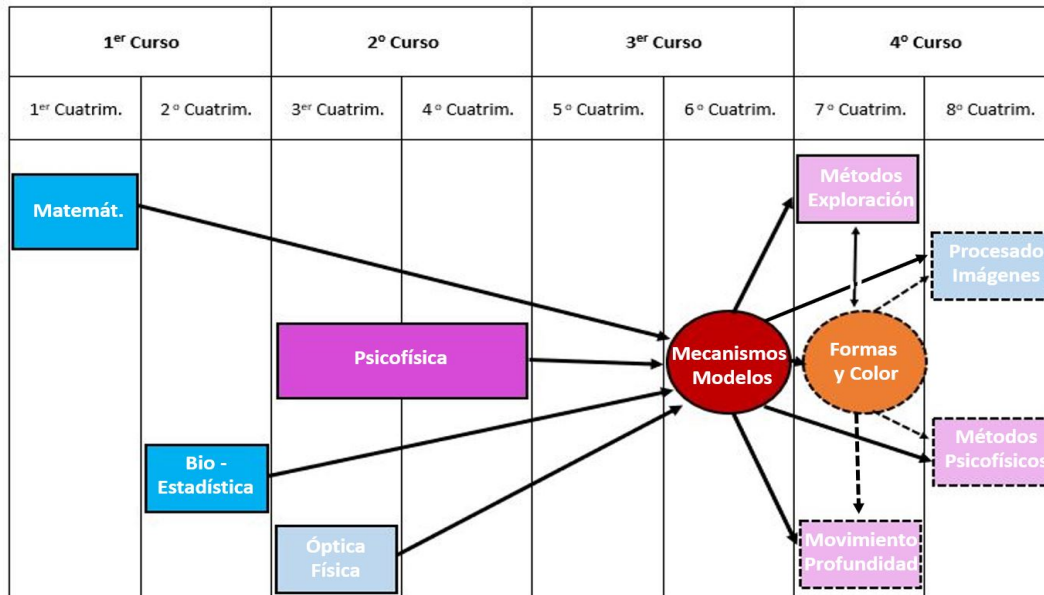


Figura 3.1: Relaciones de las asignaturas presentadas en este Proyecto Docente (en círculos) con otras asignaturas del Grado (en rectángulos). Las líneas continuas/discontinuas indican asignaturas obligatorias/optativas. No se muestran las relaciones existentes entre las asignaturas no integradas en este Proyecto docente. Por ejemplo, es obvio que Psicofísica también tiene una gran influencia en las asignaturas de Métodos, o que algunos conceptos de la parte óptica de Métodos de Exploración también son útiles en Procesado de Imagen (y sin embargo no se han trazado estas relaciones por claridad). También por claridad se han omitido las relaciones (obvias) de los antecedentes de Mecanismos y Modelos de la Visión sobre Visión de Formas y Color: todas las que influyen en la primera también lo hacen en la segunda.

modelización adquiridos en las asignaturas de la materia *Matemáticas* como en la asignatura de *Óptica Física*, como (b) la fenomenología psicovisual adquirida en la asignatura *Psicofísica de la Visión*. Como contra ejemplo, también consideramos en este apartado las asignaturas *Biología Ocular*, *Anatomía Humana y Ocular*, y *Fisiología Humana y Ocular*. Un simple listado de los contenidos que figuran en la Memoria de Verificación revela que a pesar de contar con un gran número de créditos no se abordan las descripciones funcionales de la neurofisiología que permiten relacionar cuantitativamente el comportamiento psicofísico con el sustrato neuronal, y por tanto, dicha descripción funcional (básicamente el concepto de *campo receptivo*) debe explicarse ex-novo en la asignatura *Mecanismos y Modelos de la Visión*.

En cada asignatura se describe su temporalidad (como antecedente de las asignaturas presentadas) y se recogen extractos tanto de la Memoria de Verificación del Grado (contenidos) como de las Guías Docentes actuales (extractos del temario) para poner de manifiesto las premisas sobre las que podemos iniciar el estudio en las asignaturas propuestas. Finalmente, en cada caso, se comenta explícitamente la relación.

■ Matemáticas

Descripción: Asignatura de 6 créditos ECTS, de carácter obligatorio impartida en el 1er cuatrimestre.

Contenidos: Notaciones matemáticas y conceptos básicos. Matrices y sistemas de ecuaciones lineales. Geometría del plano y del espacio. Cónicas. Funciones de una variable real: Derivadas e integrales. Introducción a las funciones de varias variables. Números complejos.

Extractos de la guía docente: [...] 2. Espacios vectoriales, matrices, sistemas de ecuaciones lineales 2.1 El espacio vectorial $\mathbb{R}^n$. Subespacios vectoriales. 2.2 Dependencia e independencia lineal. Bases. Coordenadas de un vector. 2.3 Matrices. Operaciones con matrices. 2.4 Rango de una matriz. Determinantes. Matriz inversa. 3. Geometría del plano y del espacio. [...] 3.4 Producto escalar. [...] 8. Introducción a las funciones de varias variables. 8.1 Representación gráfica. 8.2 Derivadas parciales. Vector gradiente.

Relación: Las dos asignaturas de la materia *Matemáticas* son el antecedente formal directo de las asignaturas propuestas. La capacidad de abstracción y el manejo del lenguaje analítico (espacios vectoriales, transformaciones lineales y funciones de varias variables) es fundamental para el planteamiento de modelos cuantitativos requerido en las asignaturas propuestas.

■ Bioestadística

Descripción: Asignatura de 6 créditos ECTS, de carácter obligatorio impartida en el 2o cuatrimestre.

Contenidos: La asignatura se divide en cinco grandes bloques. El primero, introduce nociones básicas del Cálculo de Probabilidades. El segundo y tercer bloque tratan, de forma general, la teoría de la estimación y del contraste de hipótesis. Esta teoría se aplica, en los últimos dos bloques, al estudio de dos modelos estadísticos de gran utilidad en las Ciencias de la Salud, el modelo de regresión (bloque IV) y el modelo de análisis de la varianza (bloque V).

Extractos de la guía docente: [...] 3. Fundamentos de probabilidad Concepto e interpretaciones de la probabilidad. Probabilidad condicionada. Teorema de la Probabilidad Total. Teorema de Bayes. Aplicaciones. 4. Variables aleatorias: Generalidades Definición y tipos de variables. Distribuciones de probabilidad: función de distribución, función de masa de probabilidad y densidad. Parámetros de una variable aleatoria: medidas de localización y dispersión. [...] 7. Regresión lineal y correlación Relación lineal entre dos variables - Gráficas de dispersión. Estadísticos básicos. Ajuste de la recta de regresión. El modelo de regresión. Inferencia sobre los parámetros del modelo lineal. Coeficientes de correlación y determinación. Interpolación predicciones.

Relación: Las dos asignaturas de la materia *Matemáticas* son el antecedente formal directo de las asignaturas propuestas. La capacidad de abstracción y el manejo de conceptos estadísticos (densidades de probabilidad, regresión, independencia y correlación), no son solo importantes en la práctica experimental en toda la materia de Percepción Visual (y en particular en el laboratorio de *Mecanismos y Modelos de la Visión*), sino que también son importantes

en interpretaciones normativas de la función visual basadas en el aprendizaje estadístico, que se introducen en *Visión de Formas y Color*.

■ Óptica Física

Descripción: Asignatura de 6 créditos ECTS de carácter obligatorio impartida en el 3er cuatrimestre.

Contenidos: La luz como onda. Interferencias. Difracción. Polarización. Propiedades ópticas de los medios materiales homogéneos.

Extractos de la guía docente: [...] 3. Difracción Introducción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer. Difracción por aberturas rectangulares. [...] Difracción por una abertura circular. Poder de resolución de los instrumentos ópticos.

Relación: Además de ejemplificar la modelización cuantitativa de fenómenos naturales complicados, esta asignatura introduce el concepto de difracción. Este concepto dará pie a la introducción del análisis de Fourier en la asignatura de *Métodos de Exploración Clínica*. Y, de forma paralela, el análisis de Fourier también resulta central para comprender los aspectos espaciales y temporales de la visión. En este contexto el concepto de campo receptivo, fundamental en la neurociencia visual introducida en *Mecanismos y Modelos de la Visión*, es totalmente paralelo al concepto de función de respuesta impulsional (o Point Spread Function).

■ Biología Ocular

Descripción: Asignatura de 6 créditos ECTS de carácter obligatorio que se cursa en el 2o cuatrimestre.

Contenidos: Introducción a la histología. La célula. Descripción y partes. Tejidos. Clasificación. Estructura general del ojo humano. Capa vascular o úvea. Estructura microscópica de la coroides, del cuerpo ciliar y del iris. Capa nerviosa. Estructura microscópica de la retina. Elementos neurogliales. Nervio óptico. Medios ópticos del globo ocular. Cristalino. Humor acuoso. Cuerpo vítreo. Anexos del globo ocular: Párpado, conjuntiva y aparato lagrimal. Capa fibrosa o esclerocorneal. Esclerótica. Córnea. Desarrollo embrionario y organogénesis de las estructuras oculares. Concepto de microorganismo. Microorganismos y enfermedades. Técnicas de esterilización de microorganismos. Técnicas de cultivo y aislamiento de microorganismos. Estructura y fisiología de la célula bacteriana. Virología. Bacterias causantes de infecciones oculares. Virus causante de infecciones oculares. Microorganismos eucariotas causantes de infecciones oculares.

Relación: como puede verse en el anterior listado completo de contenidos, en su actual formulación [de carácter *no-cuantitativo* y centrado en las estructuras oculares] esta asignatura no introduce conceptos que puedan ser utilizados para explicar (cuantitativamente) la fenomenología psicofísica.

■ Anatomía Humana y Ocular

Descripción: Asignatura de 9 créditos ECTS de carácter obligatorio impartida en el 1er y 2o cuatrimestres.

Contenidos: Introducción a la organización del cuerpo humano, terminología básica. Estudio del organismo adulto por sistemas funcionales. Sistema Osteoarticular. Sistema Cardio-Respiratorio, vascular y linfático. Sistema Digestivo. Sistema Renal y Sistema Genital. Sistema Nervioso, Central y Periférico. Organos de los Sentidos. Sentido de a vista. Organogénesis visual. Mecanismos del desarrollo del globo ocular en sus diferentes porciones. Configuración de la cavidad orbitaria. Retina visual y no visual. Organización estructural. Fovea central o mácula. Punto ciego. Uvea y coroides. Capas de la coroides. Cuerpos ciliares e Iris, estructura muscular de los mismos. Pupila. Medios transparentes y refringentes del ojo. Cristalino. Humor vitreo y humor acuoso. Conducto de Schlem. Esclerótica y córnea. Sistemas neuromusculares extrínsecos del globo ocular. Anexos del globo ocular. Párpados, cejas y pestañas. Conjuntiva. Glándula lacrimal. Vascularización del globo ocular y sus anexos.

Relación: como puede verse en el anterior listado completo de contenidos, en su actual formulación [de carácter *no-cuantitativo* y centrado en las estructuras oculares -no en las vías visuales neuronales-] esta asignatura no introduce conceptos que puedan ser utilizados para explicar (cuantitativamente) la fenomenología psicofísica.

■ Fisiología Humana y Ocular

Descripción: Asignatura de 9 créditos ECTS de carácter obligatorio que se imparte en el 1er y 2o cuatrimestres.

Contenidos: Organización funcional del cuerpo humano, homeostasis del medio interno, funciones básicas de las células, excitabilidad, comunicación intercelular. Aspectos básicos del funcionamiento del sistema nervioso. Sistema nervioso autónomo. Fisiología de la sangre. Fisiología cardiovascular, respiratoria gastrointestinal y renal. Fisiología de los sistemas de integración, nervioso y endocrino. Fisiología de la piel. Termorregulación. Neurofisiología de los movimientos de los párpados. Reflejos parpebrales. Bioquímica y fisiología de la lágrima y vías lagrimales. Bioquímica y fisiología de la córnea. Sensibilidad corneal. Bioquímica y fisiología del cristalino. Fisiología de la acomodación. Neurofisiología del iris. Reflejos pupilares. Bioquímica y fisiología del humor acuoso. Mecanismos de formación y eliminación. Bioquímica y fisiología del humor vítreo. Fisiología de los movimientos oculares. Cinemática y dinámica de los movimientos oculares.

Relación: como puede verse en el anterior listado completo de contenidos, en su actual formulación [de carácter *no-cuantitativo* y centrado en las estructuras oculares -no en las vías visuales neuronales-] esta asignatura no introduce conceptos que puedan ser utilizados para explicar (cuantitativamente) la fenomenología psicofísica.

■ Psicofísica de la Visión

Descripción: Asignatura de 9 créditos ECTS de carácter obligatorio que se cursa en el 3er y 4o cuatrimestres.

Contenidos: Experimentos psicofísicos, fundamentos y metodología. Luminosidad: Radiancia, sensibilidad espectral, luminancia, adaptación a la oscuridad

y adaptación a la luz. Visión del color: descriptores perceptuales del color, fundamentos y limitaciones de la colorimetría triestímulo, umbrales cromáticos, oponencia y adaptación cromática. Visión de patrones espacio-temporales: agudeza visual, CSF espacial, tiempos de reacción, frecuencias críticas y CSF temporal, sensibilidad a redes espacio-temporales, discriminación de contrastes, estimación perceptual de la luminosidad y del contraste. Visión de movimientos: fenomenología básica. Aspectos motores de la Visión Binocular: cinemática del ojo, dinámica del ojo, tipos de movimientos oculares, movimientos binoculares, convergencia binocular, visión binocular con prismas. Aspectos sensoriales de la Visión Binocular: dirección visual, el horóptero longitudinal, fusión binocular, espacio de Panum, rivalidad y supresión binocular, distancia visual, estereopsis. Anisometropía y Aniseiconia.

Extractos de la guía docente: [...] 3. psicofísica de la visión Introducción a la fotometría. Sensibilidad espectral del sistema visual. Umbrales de luminancia: Detección y discriminación. Visión de detalles. Tareas de agudeza visual. Curva de Sensibilidad al Contraste del Sistema Visual. Visión de estímulos breves e intermitentes. Curva de Sensibilidad al Parpadeo. [...] 4. Introducción a la colorimetría y visión del color. Trivariancia visual. Introducción a la colorimetría. Espacio de representación del color. Aparencia del color. Anomalías y deficiencias cromáticas [...] 5. Módulo práctico (i) Métodos psicofísicos [...] (v) Agudeza visual vs. desenfoque (vi) CSF acromática (vii) Introducción a la colorimetría 1 (viii) Introducción a la colorimetría 2

Relación: Esta asignatura es el antecedente fenomenológico directo de las asignaturas propuestas. Por tanto introduce cualitativamente el conjunto de fenómenos que deben explicar los modelos que se elaborarán en las asignaturas propuestas y forma a los estudiantes en los métodos experimentales para la medida de estos fenómenos.

3.3. Influencia en otras asignaturas

En esta sección repaso las asignaturas que, o bien (a) utilizan directamente conceptos introducidos en las asignaturas consideradas en este Proyecto Docente (y por tanto las tienen como antecedentes directos), o (b) tratan conceptos similares y por tanto estas asignaturas les sirven de complemento interesante.

■ Métodos de exploración clínica

Descripción: Asignatura de 4.5 créditos ECTS, de carácter obligatorio que se cursa en el 7º cuatrimestre.

Contenidos: Métodos Ópticos de Exploración Clínica. Métodos Psicofísicos de Exploración Clínica. Instrumentación clínica para la medidas de parámetros oculares y visuales de especial relevancia en el diagnóstico y tratamiento de patologías oculares. Formación de imágenes bidimensional y tridimensional. [...] Principios de diseño de test psicofísicos de diagnóstico clínico. Descriptiva de tests particulares (principios de funcionamiento, dispositivos y casos prácticos): Tests de visión del color. Campímetros de umbral incremental. Medida

de la sensibilidad al contraste acromático: CSF espacial y campímetros FDT (frequency doubling technology).

Extractos de la guía docente: [...] 2. Funciones usuales en óptica ondulatoria Escalar y desplazar funciones. Funciones trigonométricas. [...] Función rectángulo y función círculo. Función delta de Dirac. Operación de convolución. Funciones periódicas: Serie de Fourier. funciones no periódicas: Transformada de Fourier (TF). TF de funciones periódicas. TF de la convolución. TF de la función círculo. [...] 4. Formación de imágenes bidimensional. [...] Capacidad de una lente para realizar transformadas de Fourier. Formación de imágenes 2D. Cálculos de PSFs. Formación de imágenes y filtrado espacial. Ejemplos de filtrado. [...] 8. Principios básicos de diseño de tests psicofísicos de diagnóstico La hipótesis del daño selectivo y la hipótesis de reducción de la redundancia. Objetivos de los tests psicofísicos: detección, clasificación y graduación de anomalías. Elección de las características de los estímulos. Elección de la tarea. Elección del método psicofísico adecuado. 9. Tests de visión de color. Principios generales de diseño. Factores que afectan el resultado de los tests. Defectos congénitos de visión color: monocromacia, dicromacia y anomalías cromáticas. [...] 11. Campimetría II: Análisis de resultados. Localización del daño en los caminos visuales a partir del resultado de una campimetría. [...] Efecto de daños en la retina. Efecto de daños en el nervio óptico. [...] Efecto de daños en el LGN. Efecto de daños corticales. 12. Tests de evaluación de la sensibilidad al contraste con redes. Principios generales de diseño. Factores que afectan el resultado de una medida de sensibilidad al contraste. Tests basados en la medida de la CSF espacial acromática. Perimetría de sensibilidad al contraste (FDT).

Relación: La parte óptica de esta asignatura hace uso del concepto de las funciones de transferencia de un sistema óptico y por tanto revisita el concepto de filtro introducido en *Mecanismos y Modelos de la Visión* (asignatura anterior). La parte psicofísica de la misma considera anomalías que, en última instancia, se reducen a distorsiones en los parámetros de los modelos de los observadores normales. La generación de estímulos para la detección de algunas patologías ha de hacer uso de los modelos (por ejemplo de su inversa). Así mismo, el control de las propiedades espacio-temporales y cromáticas de los estímulos está relacionado con las asignaturas propuestas de dos formas: (1) desde el punto de vista teórico los estímulos dependen de la selectividad de los mecanismos que se pretende evaluar [tratados en *Mecanismos y Modelos de la Visión*], y (2) desde el punto de vista práctico, es muy conveniente la calibración espacio-temporal y cromática con la que trabajan los alumnos en *Visión de Formas y Color* (simultáneamente en ese cuatrimestre).

■ Registro y procesamiento de imágenes clínicas.

Descripción: Asignatura de 6 créditos ECTS de carácter optativo que se imparte en el 8º cuatrimestre.

Contenidos: [...] Fundamentos de la fotografía digital. Características del registro digital de imágenes. Introducción al tratamiento óptico y digital de imágenes. Técnicas básicas de restauración y mejora de imágenes.

Extractos de la guía docente: Requisitos: conocimientos muy básicos de análisis de Fourier. [...] 2. Registro de imágenes fotográficas 3. Estructura y codificación de la imagen 4. Técnicas de manipulación de imágenes 6. Prácticas de Laboratorio. [...] Manejo de la cámara digital I. Procesado de imagen con el programa GIMP.

Relación: en esta asignatura se considera la discretización de la información espacial, la separación de las imágenes en canales cromáticos, la realización de operaciones no lineales sobre los valores de dichos canales, o el tratamiento de las señales de video, y todas estas operaciones tienen su antecedente o correlato perceptual en los modelos con los que se ha trabajado en las asignaturas propuestas en este Proyecto Docente: muestreo de fotoreceptores y células corticales, canales cromáticos oponentes y saturación de la luminosidad y la cromaticidad, flujo óptico, y ventana de visibilidad. Desde un punto de vista teórico estos conceptos ya se introducen en *Mecanismos y Modelos de la Visión*, pero desde un punto de vista práctico, en *Visión de Formas y Color*, los estudiantes se acostumbran al manejo riguroso de imágenes digitales.

■ **Vision del Movimiento y la profundidad**

Descripción: Asignatura de 4.5 créditos ECTS de carácter optativo que se imparte en el 7º cuatrimestre.

Contenidos: Visión de movimiento con y sin visión de formas. El problema de la apertura y limitaciones de las células de V1 para la codificación de velocidad. Campos receptivos de MT para la definición unívoca de la velocidad. Control de ganancia de los sensores espacio-temporales en V1 y MT: post-efectos de movimiento. Mecanismos neuronales de codificación de la profundidad en el cortex extra-estriado. Relaciones entre movimiento y profundidad: profundidad a partir de movimiento, y movimiento a partir de profundidad. Agnosias relacionadas con la visión del movimiento y la profundidad.

Extractos de la guía docente: Resumen: La asignatura presenta las consecuencias de la visión binocular en la percepción de la estructura 3D de las escenas así como la base fisiológica para la realización de tales cálculos. Asimismo se presenta la descripción básica del movimiento como variación de la irradiancia en el plano imagen (flujo óptico) y la dependencia del mismo con la estructura 3D de la escena. Se analiza el funcionamiento de los mecanismos fisiológicos en V1 y MT que permiten la estimación de la velocidad en el sistema visual humano.

Relación: Esta asignatura profundiza en el concepto de flujo óptico introducido someramente en *Mecanismos y Modelos de la Visión* (asignatura anterior) y puede verse muy beneficiada por el pensamiento cuantitativo que intentamos inculcar en los estudiantes de *Visión de Formas y Color* (asignatura simultánea).

■ **Métodos Psicofísicos para la Detección y Seguimiento de Patologías Visuales**

Descripción: Asignatura con 6 créditos ECTS, de carácter optativo que se imparte el 8º.

Contenidos: Diseño de experimentos clínicos: Elección y generación de estímulos. Elección del método psicofísico de medida y control de calidad. Observadores patrón y clasificación de sujetos. Tests avanzados de práctica clínica y de laboratorio: Métodos basados en la medida de la eficiencia luminosa. Métodos basados en la medida de umbrales absolutos y relativos (curvas en función de la longitud de onda, contornos de detección, curvas de adaptación a la oscuridad). Métodos basados en la medida de la sensibilidad al contraste (CSFs acromáticas temporales y CSFs cromáticas espacio-temporales, medida de puntos singulares de la CSF, determinación del punto de equiluminosidad, campimetrías con redes). Métodos basados en la medida de las agudezas e hiperagudezas. Métodos basados en tiempos de reacción y frecuencias críticas. Métodos basados en la evaluación de la visión de movimiento: umbrales de desplazamiento mínimo y máximo, umbrales de velocidad, umbrales de coherencia. Métodos basados en la medida de los umbrales de disparidad binocular. Manejo de dispositivos en sesiones prácticas.

Extractos de la guía docente: 1. Elección y descripción de los estímulos Descripción de las propiedades espaciales y temporales de los estímulos: el dominio espacio-tiempo y el dominio de frecuencias. Descripción del contenido cromático del estímulo: espacios de representación lineales. Criterios para elegir el contenido cromático y la configuración espacio-tiempo de un estímulo. Estrategias de diseño de tests. 2. Generación de estímulos Caracterización de un dispositivo de reproducción. Limitaciones de los dispositivos de reproducción. Caso práctico: generación de estímulos estacionarios y en movimiento con un monitor.

Relación: Las anomalías consideradas en esta asignatura en última estancia se reducen a distorsiones en los parámetros de los modelos de los observadores normales. La generación de estímulos para la detección de algunas patologías debe formularse de manera precisa en cuanto a sus propiedades espacio-temporales y cromáticas en correspondencia con las propiedades del modelo patológico que se quieren determinar, propiedades tratadas en *Mecanismos y Modelos de la Visión*. De hecho, nótese la concordancia entre algunos de los métodos de detección basados en movimiento y alguna de las prácticas que se proponen en *Mecanismos* (capítulo 5). Más aun, es muy conveniente la calibración espacio-temporal y cromática con la que trabajan los alumnos en *Visión de Formas y Color* para generar en la práctica estos tests.

3.4. Centralidad de “Mecanismos y Modelos de la Visión”

Conocidos los datos procedentes de los documentos oficiales, aquí ilustro la centralidad académica de la asignatura “*Mecanismos y Modelos de la Visión*” en la materia Percepción Visual haciendo unas consideraciones sobre su parte experimental.

Tomemos como ejemplo la parte de laboratorio de esta asignatura. Evidentemente, la restricción temporal (15 horas) implica que no todos los fenómenos y modelos

cubiertos durante el curso pueden trabajarse experimentalmente. En solo tres sesiones de laboratorio ni siquiera es posible plantearse un muestreo representativo de la materia.

No obstante, a diferencia de los laboratorios de la asignatura de *Psicofísica* o las asignaturas de *Métodos*, centrados en un análisis empírico de los fenómenos o en sus aplicaciones para la identificación de anomalías, en las sesiones de laboratorio de “*Mecanismos y Modelos de la Visión*” aparecen de una u otra forma *todos* los aspectos del *Método Científico*.

Esta asignatura es la primera de la materia en que los experimentos se pueden plantear como un *método de refutar teorías*. Esto es un aspecto distintivo de esta asignatura frente a las otras de la materia Percepción Visual porque es la primera que trata los modelos subyacentes y por ello la parte experimental puede verse con propiedad como una contrastación de la teoría.

El planteamiento de las experiencias como contrastación de la teoría ayuda desde el punto de vista docente porque si uno/a debe validar una teoría o decidir entre dos modelos alternativos, es necesario hacer las cosas **bien**. Si no, la decisión será incorrecta y se tendrá una comprensión errónea de la realidad.

En el contexto de una decisión entre modelos, uno/a debe *preocuparse por*: **(a)** las fuentes de error en el experimento **(b)** hacer una comparación justa entre modelos, y **(c)** siempre interpretar los resultados experimentales en el marco de un modelo cuantitativo.

Más importante que las experiencias concretas que se cubran en el laboratorio de esta asignatura (véanse los ejemplos elegidos en el apartado de laboratorio de la Guía Docente presentada en el Capítulo 5), lo fundamental es que el/la estudiante se de cuenta de que las profesionales de las Ciencias de la Salud dedicadas a la Visión, (en tanto que *científicas*) no son ajenas a estos hechos: **(a)** la calibración de los estímulos, la calibración de los instrumentos de medida, el procedimiento ejecutado por la observadora, o la propagación de errores en los cálculos; **(b)** el ajuste de parámetros de los modelos y la estimación de la confianza en esas regresiones; y sobre todo **(c)** al hecho de que si no hay predicción cuantitativa, no hay auténtica comprensión del fenómeno.

En una palabra: desde el *experimento* a la *teoría* hay que hacer las cosas **bien**. Ese es el núcleo del método científico, (en mi opinión) no hay que darle más vueltas filosóficas. Si los/las estudiantes tuviesen esto claro, creo que el reciente concepto de *Medicina Basada en la Evidencia*³ les resultaría tan cómico como a mí⁴.

Mientras que, en la materia Percepción Visual, los puntos **(a)** y **(b)** ya se tratan en cierta medida en alguna asignatura anterior⁵, y se profundiza en ellos en algunas asignaturas posteriores⁶, y sobre el punto **(c)** se reincide en asignaturas posteriores⁷, es en “*Mecanismos y Modelos de la Visión*” donde se consideran estos tres puntos

³Web site of the Oxford Centre for Evidence-based Medicine: <https://www.cebm.net/>

⁴Sospecho que el temario de una hipotética *Medicina Basada en la Evidencia* se reducirá a esta frase: los chamanes también podría decirse que son médicos, pero, pudiendo hacer las cosas *bien*, no las vas a hacer *mal*.

⁵“Psicofísica de la Visión”

⁶“Métodos de Exploración Clínica” y “Métodos Psicofísicos de Detección y Seguimiento de Patologías Visuales”

⁷“Visión de Formas y Color”, y “Visión de Movimiento y Profundidad”

en conjunto por primera vez.

Por este carácter central y distintivo, he elegido “*Mecanismos y Modelos de la Visión*” como el núcleo del Proyecto Docente que presento.

Por otra parte, he decidido incluir también la asignatura optativa “*Visión de Formas y Color*” en este Proyecto porque es un buen complemento a la anterior para mostrar una aproximación alternativa al trabajo con modelos cuantitativos para nuestros estudiantes del Grado de Óptica y Optometría.

Capítulo 4

Toolboxes de Matlab de uso docente: Colorlab y Vistalab

Al definir la *Percepción Visual* en el capítulo 2, en la sección 2.1 se describió la concepción estándar de lo que ocurre en las primeras etapas del procesado de la información visual, entre la retina y diferentes regiones del córtex visual (e.g. en el tránsito a través del LGN a V1 y MT). En el capítulo 3 sobre la justificación y la incardinación de las asignaturas de este Proyecto, en la sección 3.4 aduje que, en mi opinión, “Mecanismos y Modelos de la Visión” tiene un carácter *central* dentro de la materia *Percepción Visual* de esta titulación porque dicha asignatura es la primera de la materia en la que se puede hablar simultaneamente de (a) fenómenos experimentales y (b) descripciones empíricas de los mismos, junto con (c) interpretaciones de dichos fenómenos en el marco de modelos cuantitativos.

De acuerdo con lo anterior, es evidente que la enseñanza de la *Percepción Visual* (como cualquier ciencia) debe tener un carácter cuantitativo. Y esto resulta ser un reto docente en el marco de esta titulación.

Como ya detallé en el Proyecto Docente que presenté para acceder a la plaza de Profesor Titular, una posible opción para abordar ese reto sin renunciar a la esencia cuantitativa consiste en seguir estas tres pautas: (i) *reducir el temario*, (ii) *ilustrar gráficamente los contenidos*, y (iii) *mejor computacional que analítico*.

Aunque aquel proyecto completo puede consultarse on-line¹, en el Apéndice A reproduzco, para la comodidad de quien lea, el capítulo que concluía con dichas

¹<http://isp.uv.es/papers/ProyDocentJMalo2002.ps>

pautas como opción para la docencia de la Percepción Visual en esta titulación. A pesar de que han pasado 16 años desde aquel texto, creo que los retos y las oportunidades siguen siendo los mismos.

En este capítulo en lugar de argumentaciones metodológicas, presento mi contribución *práctica* a dicha filosofía: los paquetes de software de uso docente **Colorlab** y **Vistalab**. Estas librerías de carácter modular y *abierto* constituyen la base a partir de la que se han podido desarrollar otras herramientas de tipo más *cerrado*, y que recientemente (del 2014 al 2016) han recibido el apoyo de distintos proyectos de innovación educativa².

Nótese que aquí los términos *abierto* y *cerrado* no se refieren a ingeniería del software³, sino a cuestiones de metodología docente. Como adelanté en la primera descripción de las asignaturas (secciones 3.1.1 y 3.1.2) *cerrado* se refiere a que el estudiante utiliza un entorno gráfico mediante el que genera ilustraciones presionando botones y fijando valores con cuadros de diálogo. Y por contra, *abierto* se refiere a que se trata de un conjunto de comandos modulares que uno debe de combinar de manera autónoma para resolver un problema.

El motivo último de estas librerías no es sólo la realización de ilustraciones o experiencias de cátedra (la segunda de las pautas citadas en el proyecto de 2002), sino fundamentalmente la tercera de ellas: abordar la parte cuantitativa de la materia con una ayuda computacional sin haber de entrar en los detalles analíticos.

En definitiva, el desarrollo de estas herramientas se debe a una pequeña *tara personal* que, modestamente, comparto con Richard Feynman:

What I cannot create I do not understand

El sesgo metodológico de mi formación como físico hace que para *entender* algo necesito un modelo computable para construirlo y poder jugar con los parámetros para explorar sus efectos. No se entiende la variabilidad infinita de los fenómenos, sino su resumen abstracto en un modelo. Por eso, cuando me enfrenté por primera vez con la docencia de la Colorimetría (allá por 1996) *necesitaba* construir y controlar los estímulos e implementar los modelos. No me bastaba con la descripción verbal de los textos al uso. Ese fue el origen de **Colorlab**: lo desarrollé para mi propio aprendizaje.

Esta manera de pensar es aplicable en todos los ámbitos de la *Percepción Visual*, donde uno puede experimentar con uno mismo y evaluar *visualmente* las predicciones de los modelos si se cuenta con las herramientas apropiadas. Estas herramientas deben posibilitar la *creación* de estímulos y la *construcción* de modelos a partir de sus elementos básicos (e.g. neuronas). Idealmente la comprensión de los modelos es completa cuando se dominan sus propiedades analíticas. No obstante, la capacidad de usar computacionalmente los modelos para hacer predicciones ya es un paso importante para la comprensión de los fenómenos.

Como creo que esta vía *constructiva* es la única forma de *entender* realmente las cosas, quiero que mis estudiantes también estén expuestos a esa forma de pensar. Así, aunque no haya tiempo de profundizar en la formulación analítica, por lo menos sí

²Proyecto UV-SFPIE-DOCE14-222555 en 2014 por *PsicoFacil*, Incentivo del SPL en 2014 por *DemoEstimuls*, y proyecto del Programa de Renovación de Metodologías Docentes en 2016 por el *Laboratorio Virtual para Psicofísica de la Visión*.

³Por supuesto que todos nuestros códigos son *open source*.

tengan acceso a las herramientas computacionales necesarias para construir sistemas sensoriales a partir de sus componentes elementales.

4.1. Colorlab: colorimetría triestímulo y visión del color en Matlab

Colorlab es una toolbox de calculo y visualización de estímulos cromáticos. Colorlab está ideada para tratar con aplicaciones cuantitativas del color de propósito general como procesamiento de imágenes en color y experimentación psicofísica. Esta librería está disponible online⁴

Esta librería empezó a desarrollarse cuando asumí la docencia de *Colorimetría* en 1996 en la antigua Diplomatura de Óptica de esta Universitat. Posteriormente, en la siguiente reforma del plan de estudios, esta asignatura se convirtió en *Colorimetría y Visión del Color*. Con la inestimable colaboración de Maria José Luque, en la línea *constructiva* descrita anteriormente, planteamos dicha asignatura entorno a ejercicios tutelados a resolver mediante Colorlab.

En concreto, Colorlab utiliza representaciones significativas de las imágenes en color (como valores triestímulo, coordenadas cromáticas y luminancia, o longitud de onda dominante, pureza y luminancia) en cualquier sistema de primarios de la colorimetría triestímulo (incluyendo estándares como CIE XYZ o CIERGB). Colorlab permite relacionar esta variedad de representaciones colorimétricas con la representación discreta del color dependiente del dispositivo que es usual en los sistemas

⁴<http://isp.uv.es/code/visioncolor/colorlab.html>

The screenshot shows the Colorlab website interface. At the top, there's a navigation bar with links like 'ISP', 'people', 'research', 'projects', 'publications', 'software', 'seminars', 'courses', and 'collaborators'. Below this, a blue banner reads 'COLORLAB: The Matlab toolbox for Colorimetry and Color Vision'. The authors are listed as 'Jesús Malo & María José Luque' with their email 'jesus.malo@uv.es' and affiliation '(c) Universitat de València 1997 - 2018'.

The main content area is divided into two columns. The left column features two color charts: the Munsell Book of Color (top) and a color calibration chart (bottom). Below these charts, a text block describes Colorlab's capabilities: it's a color computation and visualization toolbox for MATLAB, intended for general-purpose quantitative colorimetric applications. It uses colorimetrically meaningful representations (tristimulus values, chromatic coordinates, luminance, etc.) and relates them to standard color spaces (CIE XYZ, CIE RGB, etc.). It also mentions advanced color representations like CIE Lab, Luv, opponent color representations, and color appearance representations (RLab, LLab, SVF, and CIECAMs). The text emphasizes that all representations are invertible, allowing for the conversion of image processing results back to the tristimulus representation.

The right column contains four chromaticity diagrams (CIE 1931 xy, CIE 1964 uv, etc.) showing the relationship between different color spaces. Below these diagrams, a text block explains that corresponding pairs predicted with standard CIE Lab and CIECAM (implemented in Colorlab, left) are compared with statistically-based algorithms: the nonlinear Sequential Principal Curves Analysis (top-right) [NeuComp 12], and the linear Higher Order Canonical Correlation Analysis (bottom-right) [PLoS ONE 14].

informáticos. Es decir, resuelve el problema de la representación de una escena especificada colorimétricamente en un monitor estándar con la precisión que permita la tarjeta gráfica correspondiente.

Colorlab proporciona también diversas representaciones del color que van más allá de la colorimetría lineal como por ejemplo espacios uniformes de la CIE (como CIELab y CIELuv), representaciones oponentes del color basadas en modelos de apariencia del color que incluyen adaptación y constancia del color (como RLab, LLab, SVF and CIECAMs). Todas estas representaciones son invertibles y, por tanto, el resultado de las operaciones efectuadas en esos dominios siempre puede ser invertido de vuelta a un espacio triestímulo usual y representado de forma precisa en el monitor. **Colorlab** incluye rutinas de visualización útiles para representar colores en el espacio triestímulo o el diagrama cromático en cualquier base de color, así como efectuar operaciones de cuantización vectorial para el diseño de paletas cromáticas.

Colorlab también cuenta con una extensa base de datos que incluye las funciones de igualación del color de la CIE 1931, datos de reflectancias espectrales de 1250 muestras del Munsell Book of Color, elipses de discriminación de McAdam, espectros normalizados de una variedad de iluminantes estándar de la CIE, matrices para transformar a una variedad de representaciones triestímulo estándar y datos de calibración de un monitor CRT ordinario.

4.2. Vistalab: modelos de visión espacio-temporal en Matlab

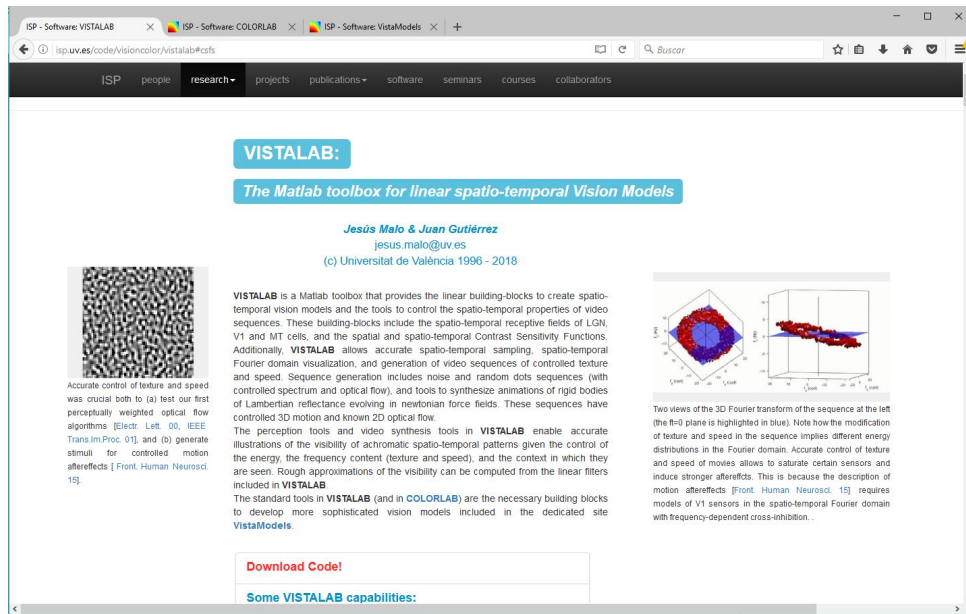
Vistalab es una Toolbox que proporciona los elementos para crear modelos de visión espacio-temporales y las herramientas para el control de las propiedades espacio-temporales de secuencias de video. Esta librería está disponible online⁵

Vistalab empezó a desarrollarse cuando asumí la docencia de las asignaturas de *Visión de Formas* y *Visión de Movimiento* en el antiguo *Master Oficial en Optometría Avanzada y Ciencias de la Visión* hacia 2006.

Los bloques elementales presentes en **Vistalab** incluyen los campos receptivos espacio-temporales de múltiples neuronas: centro-periferia en el LGN, funciones de Gabor 3D en V1, y planos orientados en el dominio de Fourier espacio-temporal para células de MT. Así mismo se incluyen las Funciones de Sensibilidad al Contraste (CSFs) acromáticas y cromáticas en el dominio espacial y el espacio-temporal listas para ser aplicadas a imágenes y secuencias reales. Y además **Vistalab** permite el control preciso del muestreo espacio-temporal, la visualización del espectro de Fourier 3D, y la generación de secuencias de video de textura y velocidad controladas. La generación de videos incluye ruido y secuencias de puntos aleatorios con espectro y flujo óptico controlado, y herramientas para sintetizar animaciones de cuerpos rígidos evolucionando en campos de fuerza Newtonianos. Estas secuencias tienen movimiento controlado en el espacio de posiciones 3D y fuljo óptico conocido en la proyección retiniana 2D.

Las herramientas de percepción y de síntesis de video de **Vistalab** permiten ilustraciones precisas de la visibilidad de patrones espacio-temporales acromáticos dado el control de la energía, el contenido frecuencial (en textura y velocidad), y

⁵<http://isp.uv.es/code/visioncolor/vistalab.html>.



el contexto en el que son vistos. Además, es posible calcular aproximaciones de primer orden de esta visibilidad mediante el conjunto de filtros lineales incluidos en Vistalab.

Es de destacar que el desarrollo de estas herramientas estándar en Colorlab y Vistalab, de gran ayuda en la práctica docente, no está en absoluto desconectada de mi actividad investigadora (véase el Apéndice B sobre mi proyecto de investigación actual). De hecho estos bloques elementales de visión espacio-temporal y cromática son los ladrillos necesarios para la contrucción de modelos más sofisticados que son el resultado práctico de la actividad investigadora de mi grupo: véanse los modelos disponibles en la página dedicada VistaModels⁶.

⁶<http://isp.uv.es/code/visioncolor/vistamodels.html>

Capítulo 5

Guía docente de la asignatura “Mecanismos y Modelos de la Visión”

5.1. Datos identificativos

Nombre de la Asignatura	Mecanismos y Modelos de la Visión
Nombre de la Materia	Percepción Visual II
Nombre de la Titulación	Grado en Óptica y Optometría
Créditos ECTS	6
Periodo de impartición	3er curso, 6o cuatrimestre
Carácter	Obligatorio

5.2. Resumen

La asignatura Mecanismos y Modelos de la Visión, que forma parte de la materia de Percepción Visual tiene como objeto el estudio de los mecanismos neuronales que intervienen en la percepción visual, así como de los modelos más simples que describen cuantitativamente la visión del color, la forma y el movimiento. Los modelos que se estudiarán serán aquellos que hacen uso de los mecanismos de bajo nivel (es decir, hasta el cortex estriado).

5.3. Objetivos generales

El resultado esperado del aprendizaje es que los/las estudiantes comprendan el correlato fisiológico de la fenomenología psicofísica de la percepción del color, la textura espacial y el movimiento; y conozcan los modelos cuantitativos que describen estos fenómenos. Este objetivo genérico es consistente con todas y cada una de las competencias específicas (o destrezas) recogidas en el apartado siguiente.

5.4. Destrezas

- CE92** Conocer los modelos básicos de visión.
- CE93** Conocer los aspectos espaciales y temporales de la visión.
- CE94** Saber correlacionar los experimentos psicofísicos con la fisiología del sistema visual.
- CE95** Conocer y aplicar la teoría de Fourier a los modelos de visión.
- CE96** Conocer los modelos básicos de visión del color, forma y movimiento.
- CE97** Conocer los aspectos cromáticos espaciales y temporales de la visión.

5.5. Conocimientos previos

Son necesarios conocimientos previos de Psicofísica de la Visión, y serían convenientes conocimientos elementales sobre la Anatomía y la Fisiología de la parte neuronal del sistema visual.

5.6. Temario y planificación temporal

Esta asignatura pretende establecer las relaciones entre el sustrato fisiológico de los caminos neuronales visuales y los fenómenos psicofísicos relacionados con el color, la textura espacial y el movimiento. Para ello, primero se caracteriza cuantitativamente el comportamiento psicofísico del sistema introduciendo el aparato matemático necesario (en los temas 1-5) y después se estudian las propiedades de las vías visuales que dan lugar a un modelo fisiológico totalmente paralelo al modelo psicofísico presentado en la primera parte del curso (temas 6-9).

La planificación temporal es la siguiente, indicándose la duración total de cada tema en negro y las horas dedicadas a seminarios en grupos reducidos en rojo.

- Tema 1. Introducción: Visibilidad de patrones espacio-temporales y cromáticos
3h 1h
- Tema 2. Modelos psicofísicos de visión del color 8h 2h
- Tema 3. Anchura de banda: texturas y movimiento 8h 2h
- Tema 4. Mecanismos psicofísicos de codificación de texturas 3h
- Tema 5. Modelo psicofísico de visibilidad 5h 5h
- Tema 6. Una neurona y un sistema de neuronas 6h
- Tema 7. Campos recept. y sistemas de neuronas en LGN, V1 y MT ... 6h 3h
- Tema 8. Modelos de interacción cortical 3h
- Tema 9. Modelo fisiológico de visibilidad 3h 2h

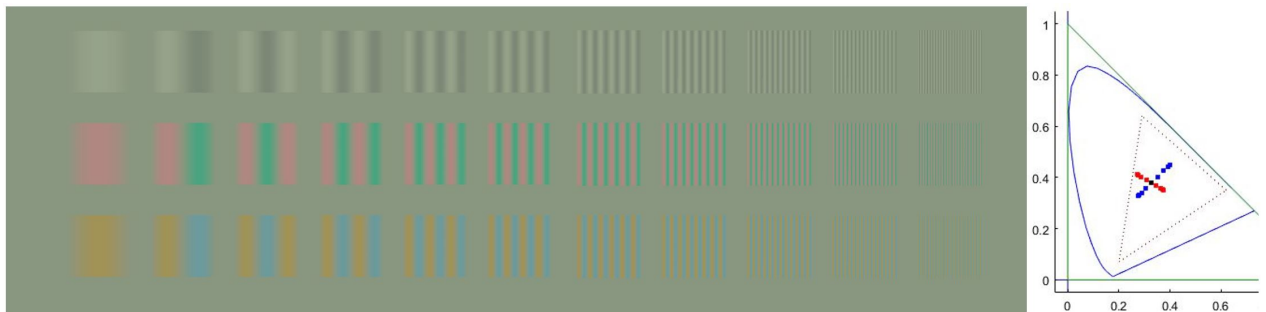
- Sesiones de laboratorio $5h \times 3 = 15h$
 - Cambio de espacio en Colorimetría Triestímulo
 - Inducción de contraste: modelos divisivos y sustractivos
 - Coherencia de la velocidad en secuencias de puntos aleatorios

En los seminarios en grupos reducidos el profesor hace experiencias o simulaciones demostrativas utilizando materiales complementarios desarrollados con **Colorlab** y **Vistalab**. En la descripción de cada tema se indica donde se intercala cada uno de estos seminarios y aquí incluyo un listado de los mismos.

- Tema 1. 1h. Demo de dimensiones perceptuales del color e indicaciones para el uso (voluntario) de materiales complementarios desarrollados por el profesor.
- Tema 2. 1h. Formulario colorimetria triestímulo y uso de **Matlab** como calculadora.
- Tema 2. 1h. Demo cambio de iluminante y adaptación cromática.
- Tema 3. 1h. Demo transformada de Fourier 1D, 2D, 3D.
- Tema 3. 1h. Demo aplicación de filtros 2D y 3D.
- Tema 5. 5h. Construcción del modelo psicofísico para el cálculo de visibilidades.
- Tema 7. 1h. Demo neuronas LGN.
- Tema 7. 1h. Demo neuronas V1.
- Tema 7. 1h. Demo neuronas MT.
- Tema 9. 2h. Construcción del modelo fisiológico para el cálculo de visibilidades.

Tema 1.**Introducción: Visibilidad de patrones espacio-temporales y cromáticos 3h 1h**

- 1.1** Psicofísica, Fisiología y Computación en Percepción Visual
- 1.2** Dimensiones perceptuales de los estímulos visuales
- 1.3** Dimensiones perceptuales del color
- 1.4** Factores que influyen en la visibilidad de un test visto en un entorno
 - Energía y contraste
 - Color
 - Contenido frecuencial, textura y velocidad
 - Entorno espacio-temporal, fenómenos de inducción y adaptación



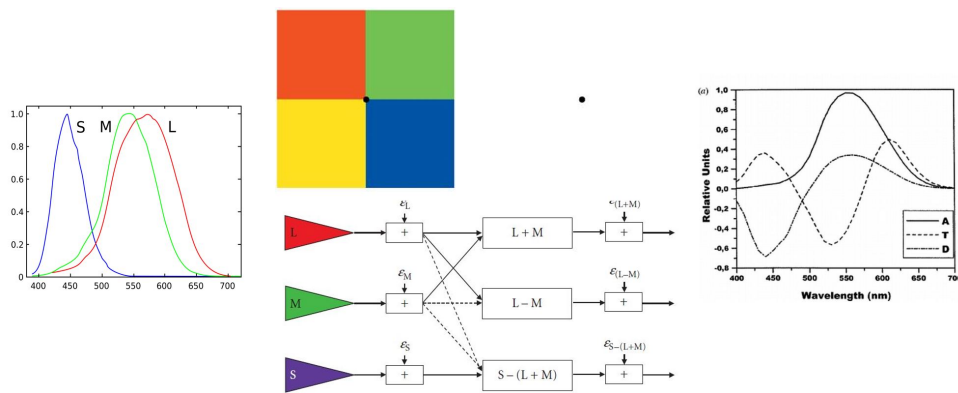
El curso se inicia con una reflexión sobre las tres aproximaciones posibles al estudio de la Percepción Visual y su relación con los diferentes niveles de comprensión del fenómeno de la Visión sugeridos por David Marr. Mientras que en el curso anterior se introdujo a los estudiantes en la fenomenología psicofísica básica, en este curso se abordará el correlato fisiológico de dicha fenomenología y se presentarán los modelos computacionales asociados, aunque el trabajo detallado con estos modelos se deja para las asignaturas optativas del curso siguiente.

A continuación, se presentan las dimensiones de bajo nivel de los estímulos visuales: color, textura, movimiento y profundidad, y se dedica un seminario específico a una experiencia de cátedra (utilizando **Colorlab**) en la que se ilustra el carácter no trivial de las cinco dimensiones independientes del color en el caso de escenas complejas: luminosidad, tono, colorido, claridad y croma/saturación. Finalmente, se revisan, ejecutando materiales complementarios (utilizando **Vistalab**) los factores que influyen en la visibilidad de un patrón espacio-temporal.

Se aprovechan las experiencias de cátedra para mostrar a los alumnos el modo en que pueden ejecutarse los materiales complementarios en **Matlab** asociados a la asignatura.

Tema 2.**Modelos psicofísicos de visión del color8h 2h**

- 2.1** Colorimetría triestímulo
- 2.2** Espacios oponentes psicofísicos. Observaciones de Hering, post imágenes, Experimento de cancelación de tono y tonos únicos.
- 2.3** Limitaciones de los modelos lineales.
- 2.4** Modelos divisivos de adaptación cromática. Von Kries



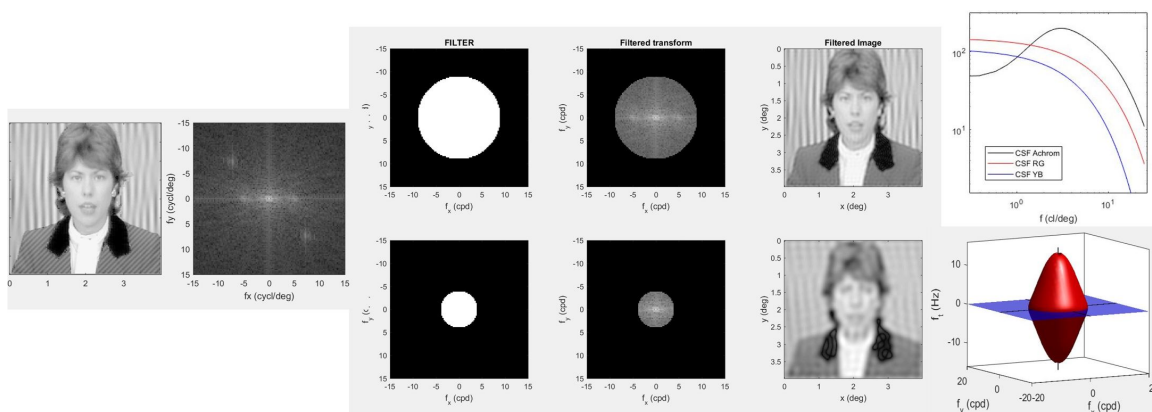
El estudio de la visión del color se inicia introduciendo el proceso de integración espectral a nivel de conos LMS y dedicando un seminario específico a la revisión de la formulación lineal de la colorimetría triestímulo: primarios y unidades tricromáticas; valores triestímulo; funciones de igualación del color y sensibilidades espectrales; coordenadas cromáticas y luminancia; longitud de onda dominante, pureza y luminancia. Se recuerda el concepto de cambio de base y las representaciones CIE RGB y XYZ. Además del formulario y la revisión de los conceptos, en este seminario se presenta a los estudiantes la posibilidad del uso de **Matlab** como una calculadora conveniente para aplicar las fórmulas de la colorimetría (que incluye productos escalares y operaciones matriciales).

Después se introduce mediante ejemplos cualitativos la necesidad de los espacios oponentes y las evidencias psicofísicas que lo sustentan. Se propone un cierto modelo con unas funciones de igualación coincidentes con los experimentos de cancelación de Jameson y Hurvich que servirá de referencia para su interpretación según la sensibilidad espectral de las células del LGN que se verán en el tema 7.

A continuación se dedicará un seminario específico (utilizando demos elaboradas con **Colorlab**) analizando el efecto del cambio de iluminación en las representaciones lineales del color evidenciando la necesidad de la consideración de mecanismos de adaptación cromática para explicar la constancia perceptual del color. Estas evidencias motivan el estudio de las limitaciones de la colorimetría triestímulo lineal y la proposición de modelos simples (divisivos) de adaptación cromática.

Tema 3.**Anchura de banda: texturas y movimiento 8h 2h**

- 3.1** Transfromada de Fourier 1D, 2D, y 3D. Interpretación geométrica (base de espacio vectorial de funciones). Representación de texturas y velocidades.
- 3.2** Caracterización de un sistema lineal invariante a desplazamientos en el dominio de Fourier. Filtro.
- 3.3** Función de sensibilidad al contraste como sensibilidad (ganancia) del sistema ante cada componente frecuencial de una escena complicada. Definición y medida de la CSF.
- 3.4** CSFs espaciales acromática y cromáticas
- 3.5** CSFs espacio-temporales. Movimientos oculares y seguimiento.

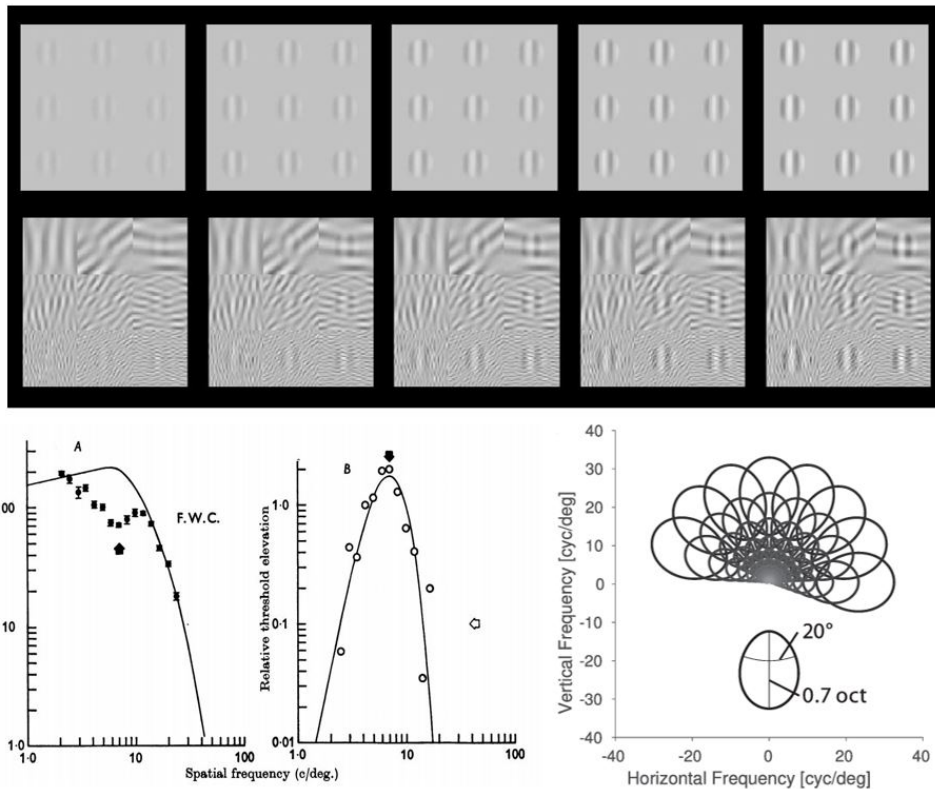


La caracterización del cuello de botella informativo del canal retina-cortex requiere la comprensión del concepto de filtro y anchura de banda en el dominio de Fourier. Por ello, además de usar las sesiones de teoría para introducir la representación de Fourier como los coeficientes del estímulo en una cierta base de funciones (haciendo referencia al cambio de base en colorimetría triestímulo); se dedicará un seminario específico para ilustrar (mediante demos hechas con *Vsitalab*) el análisis de señales 1D, 2D y 3D y así entender los conceptos de textura y velocidad en el dominio de Fourier. También se dedicará un seminario para ilustrar el concepto de filtro, frecuencia de corte y anchura de banda; así como el concepto de respuesta impulsional.

Después de esto, el concepto y la medida de la Función de Sensibilidad al Contraste resulta más intuitivo. Y así los diferentes ejemplos (funciones espaciales, acromáticas y cromáticas; y funciones espacio-temporales) son solamente casos particulares del concepto general.

Tema 4.**Mecanismos psicofísicos de codificación de texturas3h**

- 4.1** Enmascaramiento. Descripción cualitativa.
- 4.2** Variaciones en la CSF tras la adaptación a sinusoides. Experimento de Campbell y Blakemore.
- 4.3** Distribución de sensores de textura en el dominio de Fourier.

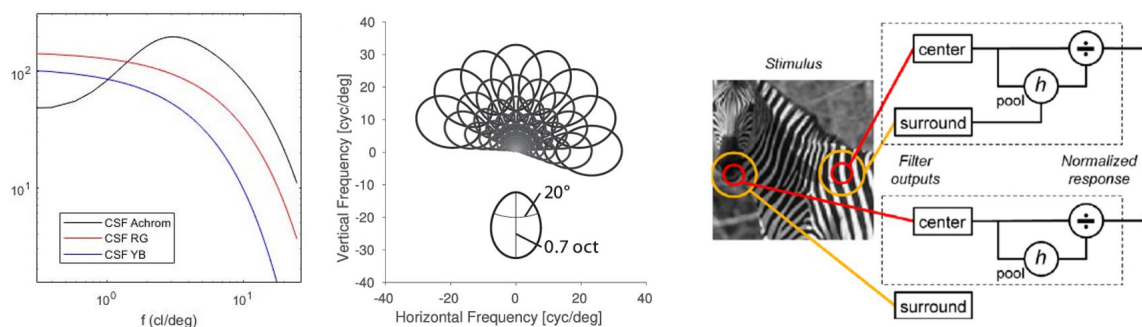


Mediante una experiencia de cátedra ejecutada en **Vistalab** se presenta cualitativamente el fenómeno de la reducción de la sensibilidad debida al enmascaramiento. De esta forma se comprende cualitativamente los resultados de los experimentos de variación de la CSF después de la adaptación a redes sinusoidales que son la prueba psicofísica de la existencia de mecanismos subyacentes de banda estrecha (entorno a una octava en frecuencia y unos 30 grados en orientación).

Introducidos estos resultados, se presenta como es el recubrimiento (log-polar) del dominio de Fourier mediante este tipo de sensores de banda estrecha y como son sus respuestas impulsionales (funciones de Gabor).

Tema 5.**Modelo psicofísico de visibilidad 5h 5h**

- 5.1** Transformación cromática.
- 5.2** Análisis de textura con un banco de filtros tipo wavelet.
- 5.3** Modelo de enmascaramiento frecuencial y de orientación. Normalización divisiva.
- 5.4** Extensión al caso espacio-temporal-cromático.
- 5.5** Cálculo de la visibilidad como medida de distancia en el dominio de respuesta. Sumación



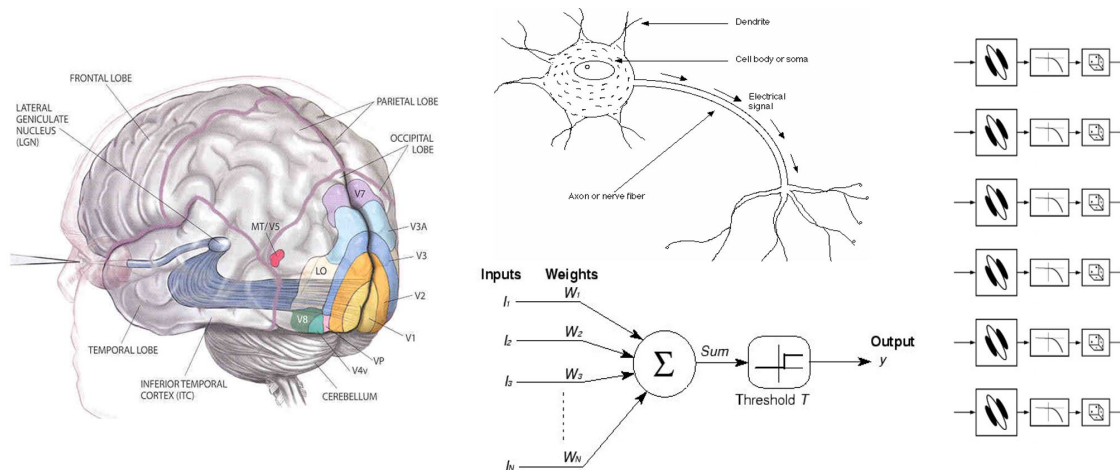
Este tema resume de forma práctica los mecanismos psicofísicos presentados hasta el momento. Por ello, mientras se van introduciendo los conceptos fisiológicos en el tema siguiente, este tema se desarrolla en paralelo exclusivamente en seminarios específicos donde el profesor va implementando paso a paso (con **Colorlab** y **Vistalab**) un modelo razonable que pueda aplicarse a una imagen en color. En estos seminarios el profesor discute con los alumnos los parámetros libres de los modelos y va ejecutando las ordenes correspondientes en **Matlab** resultado de dicha discusión.

Se comenta el caso generalizado del enmascaramiento y la extensión del modelo al caso espacio-temporal. Finalmente se retoma la cuestión de la reproducción cuantitativa de la visibilidad utilizando una medida de la variación de esta representación de la señal. En este contexto, el concepto de *sumación* de las variaciones de respuesta de una población de sensores surge de manera natural.

Tema 6.

Una neurona y un sistema de neuronas 6h

- 6.1 Áreas cerebrales involucradas en la visión de bajo nivel.
- 6.2 Complejidad de las neuronas reales. Excitación inhibición, Spikes y Rate.
- 6.3 Modelos eléctricos. Hodgkin y Huxley.
- 6.4 Modelo lineal de neurona. McCulloch y Pitts, y Hubel y Wiesel.
- 6.5 Campo receptivo. Definición y métodos idealizados de medida.
- 6.6 Sistemas de neuronas. Formulación matricial.
- 6.7 Cálculo efectuado por un sistema de neuronas.

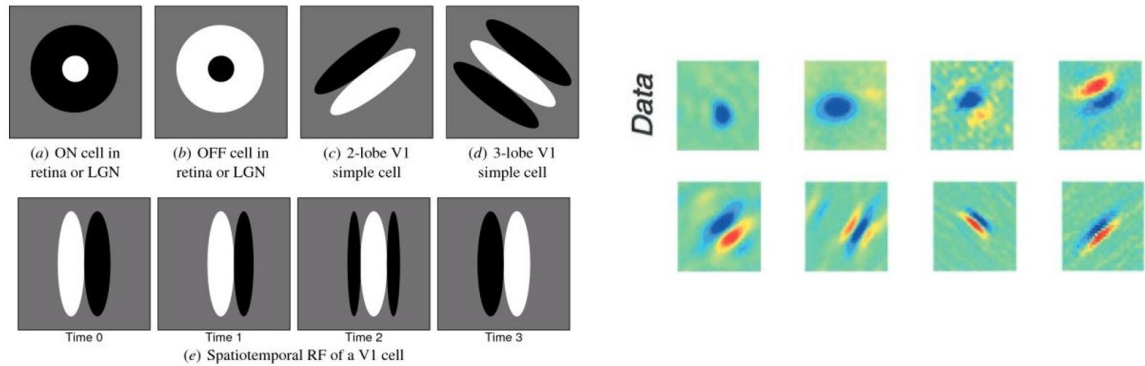


En este tema se introducen los conceptos fisiológicos relevantes para la comprensión de la *función* realizada por las vías visuales, y que sorprendentemente no se tratan en los 24 créditos de asignaturas básicas *Biología Ocular*, *Anatomía Ocular*, *Fisiología Ocular* como puede verse en sus descriptores del Plan de Estudios.

Aquí, después de tratar el tipo de señales que se intercambian las neuronas y citar los modelos eléctricos que explican la generación de pulsos; nos centramos en modelos (clásicos) de tasa de pulsos por unidad de tiempo, donde pueden codificarse valores con signo mediante aumentos y disminuciones de esta tasa respecto del nivel de actividad espontánea. En estos modelos de *tasa*, la salida de una neurona puede verse, en primera aproximación, como una combinación lineal de las entradas. Esta formulación lineal conduce al concepto clásico de *campo receptivo* y a las ideas básicas para su medida experimental. En este punto se retoma el concepto de integración espectral de la colorimetría triestímulo y se generaliza, interpretando la *aplicación* de un sensor sobre un estímulo como el producto escalar entre el vector *campo receptivo* y el vector *estímulo*. Esto lleva a la formulación matricial de poblaciones de neuronas de forma natural.

Tema 7.**Campos receptivos y sistemas de neuronas en LGN, V1 y MT****6h 3h**

- 7.1** Campos receptivos en LGN, parte espectral y espacio-temporal.
- 7.2** Cálculo en LGN: oponencia y anchura de banda.
- 7.3** Campos receptivos en V1, parte espacio-temporal.
- 7.4** Cálculos en V1: estimación de bordes y texturas.
- 7.5** Campos receptivos en MT, parte espacio-temporal.
- 7.6** Sintonizado en velocidad en V1 y MT.

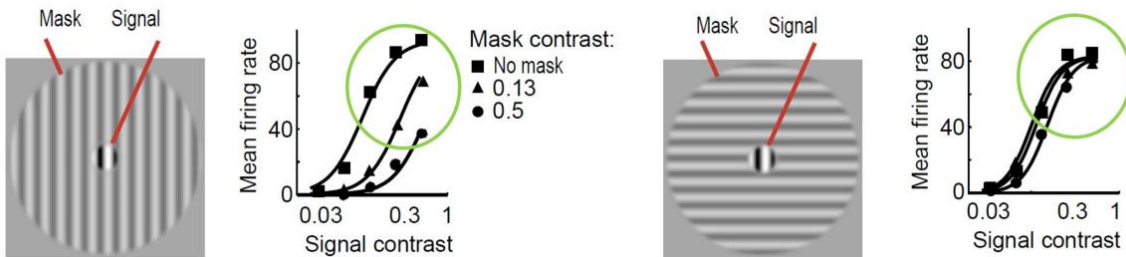


Una vez descrito el concepto de campo receptivo en el tema anterior, en este tema se listan los resultados experimentales para tal concepto en las vías visuales: Nucleo Geniculado Lateral (LGN), corteza visual primaria (V1), y región media temporal (MT). Se tratan los aspectos espacio-temporales y cromáticos en el caso del LGN porque dichos aspectos explican las CSFs vistas en el tema 3 y la existencia de canales cromáticos oponentes con la sensibilidad espectral descrita en el tema 2. En el caso de V1 se describen posibles recubrimientos del dominio de Fourier espacio-temporal y como combinaciones lineales de subconjuntos de neuronas de V1 dan lugar a los campos receptivos de MT.

En tres seminarios específicos se ilustran el tipo de cálculos que se ejecutan en LGN, V1 y MT respectivamente. En estas sesiones con grupos reducidos, además de demos con **Vsitalab** las consecuencias sobre la señal transmitida, se realiza de forma explícita el producto escalar de campos receptivos orientados sobre una imagen sencilla para poner de manifiesto como estos sensores detectan los contornos de los objetos. Aunque se pone de manifiesto el diferente sintonizado en velocidad de las neuronas de V1 y MT, no se relacionan de forma cuantitativa estos resultados con la ilusión de la apertura porque la ecuación del flujo óptico y sus indeterminaciones se dejan para la asignatura optativa Visión de Movimiento y Profundidad.

Tema 8.**Modelos de interacción cortical 3h**

- 8.1** Saturación en las respuestas neuronales.
- 8.2** Modelos divisivos y modelos sustractivos de inhibición cruzada.
- 8.3** Repetición del esquema lineal+nolineal+pooling para obtención de invariancias.

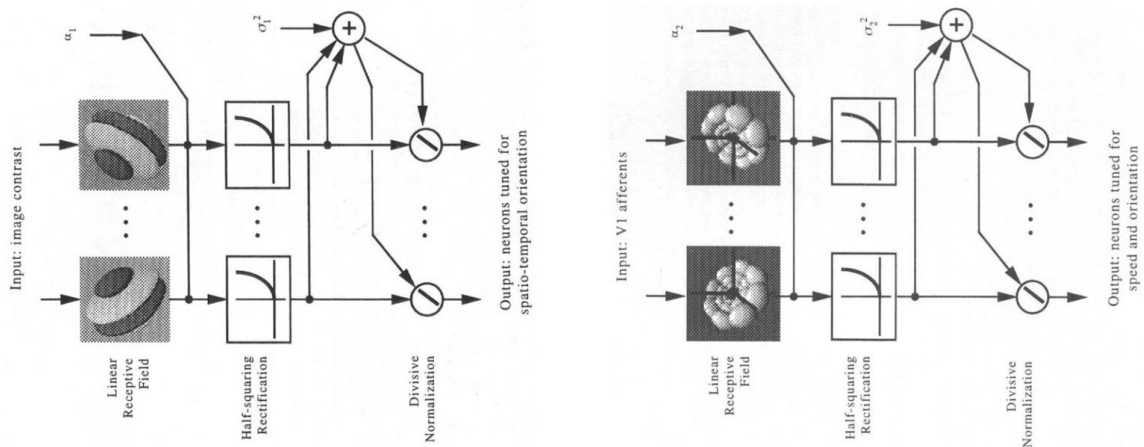


Aquí se retoma brevemente la fenomenología del enmascaramiento que se trató en los temas 4 y 5 pero ahora mostrando medidas sobre neuronas de V1. Se describen modelos de interacción de tipo divisivo similares a los del tema 5 y alternativas de tipo sustractivo.

Finalmente se comenta la repetición de este esquema de asociación de transformaciones lineal+nolineal mas allá de V1 y MT. En el proceso de suma tras la no linealidad (pooling) se promedia sobre sensores sintonizados a diferentes características. Este promediado implica que los sensores resultantes responden de la misma forma sea cual sea el sensor aferente estimulado. Es decir, los sensores tras el pooling (p.ej. células complejas frente a células simples) tienen propiedades de invariancia (a fase, a rotación, etc.).

Tema 9.**Modelo fisiológico de visibilidad3h 2h**

- 9.1** Cascada de matrices y transducciones.
- 9.2** Análisis de textura con un banco de filtros tipo wavelet 3D.
- 9.3** Modelo de enmascaramiento frecuencial, de orientación, y de velocidad.
- 9.4** Cálculo de la visibilidad como medida de distancia en el dominio de respuesta.



Este tema es paralelo al tema 5 y también se plantea en seminarios de grupos reducidos donde el profesor a lo largo de varias sesiones implementa el modelo discutiendo los detalles con los estudiantes. En este caso, se hace más énfasis en la formulación matricial donde el concepto de campo receptivo y la conectividad entre capas neuronales es más patente, en lugar de los filtros pasa-banda empleados en el tema 5. Esta formulación matricial permite imaginar lesiones selectivas en determinados sensores, y la inversa de la matriz correspondiente permite simular que tipo de información ha perdido el sujeto anómalo correspondiente.

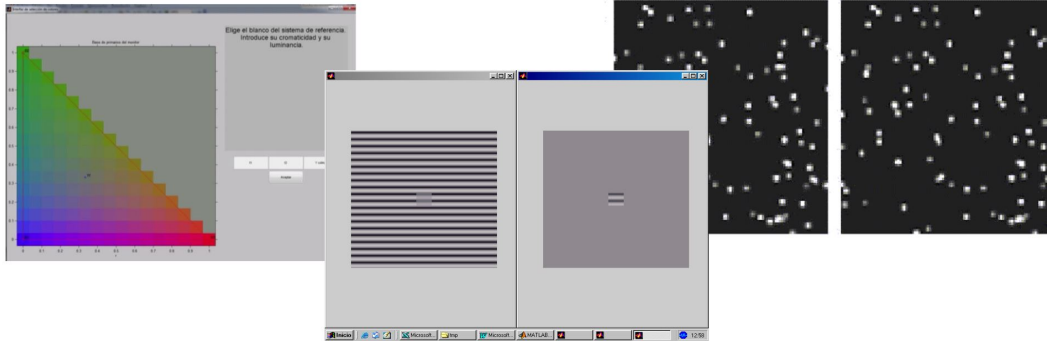
Finalmente el concepto de suma de las distorsiones sobre una población de sensores también aparece de forma natural.

Sesiones de laboratorio 15h

Sesión 1 Cambio de espacio en colorimetría triestímulo.

Sesión 2 Inducción de contraste: modelos divisivos y sustractivos.

Sesión 3 Coherencia de la velocidad en secuencias de puntos aleatorios.



Como se indicó en el punto 3.4, esta asignatura es la primera de la materia Percepción Visual en la que *con propiedad* pueden verse los experimentos como una contrastación/refutación de un modelo cuantitativo. De la misma manera, el uso de modelos para reproducir cuantitativamente los fenómenos experimentales ejemplifica de manera clara la metáfora epistemológica de Feynman que citaba en las páginas iniciales: *What I cannot create, I don't understand*. Sin modelos cuantitativos *no* se entienden los fenómenos.

Ese es el mensaje central a transmitir todas las las prácticas de esta asignatura. Y de ese mensaje central se deriva la preocupación por un correcto diseño experimental y de tratamiento de los datos. Las tres prácticas propuestas aquí cumplen esa misión.

- En la primera de las prácticas los estudiantes chequean experimentalmente una predicción cuantitativa central en los modelos lineales de visión del color (tratados en el tema 2). Miden experimentalmente los valores triestímulo de un color en dos bases de primarios diferentes y después tratan de predecir las medidas obtenidas en cada espacio a partir de las medidas hechas en el otro y el modelo de cambio de espacio. En este contexto aparece de manera natural la importancia de la correcta generación de estímulos, la calibración de monitores, el ruido en fotómetros y colorímetros, el error en la experiencia de igualación y su propagación a través de los cálculos de predicción que hay que realizar en un modelo. Refutar la teoría triestímulo implica hacer todas esas cosas *bien*.
- En la segunda práctica los estudiantes deciden experimentalmente entre dos modelos de inducción de diferente naturaleza (divisivo o sustractivo), tratados en los temas 5 y 8. En este caso (si la sesión de laboratorio resulta anterior a la exposición en teoría), los alumnos primero *observan* el fenómeno, después se les hace caer en la cuenta de que dicho fenómeno puede describirse cuantitativamente según dos modelos alternativos y la decisión entre ellos debe basarse

en cual de ellos se aproxima más a la realidad. En este contexto aparece de forma natural la relevancia de un correcto método experimental (e.g. estímulos constantes y función psicométrica) para tener medidas precisas, y la correcta elección de los parámetros de los modelos para reproducir las medidas (ajuste por mínimos cuadrados). El error de predicción es lo que debe decir la polémica entre modelos. Decidir entre teorías implica hacer todas esas cosas *bien*.

- En la tercera práctica los estudiantes chequean experimentalmente que para percibir el sentido de la velocidad de un patrón en movimiento (tratado en los temas 3 y 7) es necesario que la fracción de la escena que se mueve en ese sentido alcance un cierto umbral. No obstante, el objetivo de la práctica no es clínico (si el umbral es mayor o menor eres patológico o normal). Aquí se trata de comprender *porqué* esto es así. Después de la determinación experimental por parte de los alumnos en la primera parte de la práctica, el profesor analiza la serie de estímulos constantes utilizados en el dominio de Fourier espacio-temporal. Y se ve que al ir aumentando el grado de coherencia, la cantidad de energía fuera del plano de frecuencia temporal nula va creciendo progresivamente. El umbral indica la cantidad de energía mínima que necesitan los sensores del observador en esa región para dar respuesta significativa sobre el nivel de ruido. Entender los fenómenos implica hacer las cosas *bien*.

Evidentemente estas no son las únicas experiencias en las que puede combinarse de forma adecuada *experimento y teoría*. A lo largo de los años tanto en este laboratorio como en los que lo precedieron en otras versiones del Plan de Estudios hemos desarrollado prácticas que siguen el mismo espíritu y cuya implementación se ve simplificada por las herramientas que hemos desarrollado: *Colorlab*, *Vistalab*, y *DemoEstimuls*.

Ejemplos de esto incluyen: medida y aplicación de las CSFs, medida de no linealidades de contraste a partir de umbrales incrementales con ajuste de modelos no lineales, medidas de distorsión subjetiva de imágenes y ajuste de modelos para su reproducción, simulación de medidas de campos receptivos, simulación de medidas de sintonización a velocidad de neuronas en V1 y MT, análisis de los campos receptivos de neuronas en los dominios de Fourier 2D y 3D, etc...

5.7. Bibliografía

■ Bibliografía básica y generalista

- D. Heeger. Apuntes de su asignatura Visual Perception en la NYU.¹ 2006
- B. Wandell. Foundations of Vision. Sinauer Assoc. NY. 1995
- Zhaoping Li. Vision: data and theories. Cambridge Univ. Press. Cambridge 2014
- M. Fairchild. Color Apperance Models. Wiley 2013
- P. Capilla et al. Fundamentos de Colorimetría. Ed. Univ. Valencia 2002
- P. Capilla et al. Ciencia y Tecnología del Color. Ed. Univ. Valencia 2002
- P. Capilla Percepción Visual: Psicofísica, Mecanismos y Modelos. Ed. Interamericana 2018
- Transparencias de clase y Materiales Complementarios (demostraciones desarrolladas en Vistalab y Colorlab preparadas para la asignatura).

- **Bibliografía complementaria I:** específica por temas. Este material (textos en *.pdf, y código en *.m) está disponible para los alumnos en la página de la asignatura.

Tema 1 Introducción

- Ejemplo para abrir la charla sobre dimensiones perceptuales de los estímulos visuales. Artículo de divulgación [51].
- Epistemología en Ciencias de la Visión. Niveles de abstracción en la comprensión de la Percepción Visual: la fenomenología psicofísica, la implementación fisiológica, y la problemática computacional. Filosofía de D. Marr en su libro Vision, MIT 1980 [52] resumida en el prefacio de Dayan and Abott, en su libro Theoretical Neuroscience, MIT 2001 [53].
- Dimensiones perceptuales de los estímulos visuales: diferencias entre la descripción física del estímulo y la descripción de la Percepción Visual [5].
- Factores que influyen en la visibilidad de un patrón espacio-temporal y cromático [1].

Tema 2 Modelos psicofísicos de visión del color. [5, 54]

Temas 3, 4 y 5 Mecanismos y modelos psicofísicos de visión de patrones espacio-temporales

- Transformada de Fourier. Transformada de Fourier 3D y movimiento en el dominio de Fourier. Artículos de divulgación [51] y de docencia [55, 56], ejemplos seleccionados en textos de procesamiento de imágenes [57] y artículos de investigación [10, 58].

¹<http://www.cns.nyu.edu/~david/courses/perception/lecture-notes.html>

- Funciones de sensibilidad al contraste: acromática [15], cromáticas [18], del Observador Espacial Estandar [59], espacio-temporal [16, 60].
- Mecanismos pasa-banda revelados por bajadas en la CSF con adaptacion [61, 62]
- Banco de filtros lineales pasa banda. Caso espacial [26], caso espacio-temporal, [10, 58].
- Efectos del fondo sobre la visibilidad del test [63], Respuestas no-lineales a partir de umbrales incrementales [64] Adaptación y enmascaramiento con normalizacion divisiva [65, 66] Postefectos por adaptacion y masking con normalizacion divisiva [67].
- Sumación y medidas de distancias [68, 69]

Temas 6, 7 y 8 Mecanismos fisiológicos

- Areas de Brodmann y Visual Cortex. Wikipedia^{2,3}.
- Estructura de una neurona. Fisiología de neurona individual. Web David Heeger, NYU⁴.
- Ruido neuronal. Scholarpedia⁵.
- Medida del campo receptivo V1 con estímulos luminosos. Videos demostrativos de Hubel y Wiesel en youtube⁶.
- Campos receptivos lineales en LGN [70].
- Campos receptivos lineales en V1 [41, 49].
- Campos receptivos espacio-temporales lineales en V1 [58].
- Normalizacion Divisiva en la parte espacial de V1 [71, 72].
- Modelo lineal+ no lineal Normalizacion divisiva espacio-temporal en V1 y MT [73].
- Modelo Lineal-No lineal espacio-temporal y su efecto en percepcion de velocidades [67].

Temas 5 y 9 Implementacion computacional de los modelos psicofísicos y fisiológicos

- Teoría: Formulación y ejemplos de uso del software [74].
- Práctica: Tutoriales de introducción al **Matlab**. Ayudas de los materiales complementarios Ayudas de **Colorlab**. Ayudas de **Vistalab**. Artículos docentes [55, 56]

- **Bibliografía Complementaria II:** incluyo aquí una relación de libros de texto y material de carácter generalista pero de temática o con una aproximación complementaria al curso. Esta literatura está disponible en la biblioteca de la universidad o se facilitan los pdfs correspondientes al estudiante interesado:

²https://en.wikipedia.org/wiki/Brodmann_area

³https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_cortex

⁴<http://www.cns.nyu.edu/~david/courses/perception/lecturenotes/brain/brain.html>

⁵http://www.scholarpedia.org/article/Neuronal_noise

⁶<https://www.youtube.com/watch?v=8VdFf3egwfg>

Chalupa and Werner (Eds.) [75]. Dayan and Abott [53]. Material Coursera Intro to Computational Neuroscience 2014. Material Coursera Intro to brain imaging using fMRI 2016. Artigas et al [76]. Schwartz 99 [77]. Spillmann 90 [78]. Wyszecki 82 [32]. Boynton 92 [79]. Pratt 91 [80]. Gonzalez 87 [81]. DeValois 90 [82]. Hunt 95 [35]. Kang 97 [83]. Landy y Movshon 91 [84]. Strang 98 [85]. Duda 72 [86]. Anshel 97 [87]. Watson 93 [31].

5.8. Volumen de trabajo

En la consideración del volumen de trabajo se ha tenido en cuenta un periodo lectivo cuatrimestral de 15 semanas. La equivalencia es de 1 crédito ECTS/25h de trabajo del alumnado, lo que supone un total de 150h de volumen de trabajo total. Considerando una presencialidad del 40 %, como se indica en el Plan de Estudios, las actividades presenciales representan un total de 60h.

Actividad	Descripción	Horas
Seminarios teórico-prácticos en grupos reducidos	Experiencias de cátedra y simulaciones discutidas con los estudiantes	15
Clases teóricas	Clases magistrales de teoría	30
Sesiones de Laboratorio	Experimentos psicofísicos interpretables mediante modelos cuantitativos	15
Estudio de fundamentos teóricos	Estudio regular y preparación del examen	45
Trabajos prácticos	Ejecución de materiales complementarios y preparación de memorias de prácticas	40
Tutorías individuales	Consulta puntual individualizada de dudas y cuestiones	5
TOTAL (trabajo presencial + autónomo)		150

5.9. Metodología Docente

Como se ha comentado en el punto 3.4, esta es la primera asignatura de la materia en la que se pueden combinar las herramientas teóricas y experimentales. En cualquier caso, la metodología docente empleada se adaptará a las modalidades de docencia impartida:

Clases de Teoría. Las lecciones o temas propiamente dichos serán explicados por el profesorado según el modelo de lección magistral. Sin embargo, para aspectos específicos que requieran mayor atención por su dificultad conceptual o conveniencia en la ilustración se harán uso de *seminarios*.

Seminarios en grupos reducidos. En estas sesiones, o bien se plantean ejercicios numéricos (en la parte de visión del color), o se realizan ilustraciones dirigidas por el profesor, normalmente demos desarrolladas con las herramientas **Vistalab** o **Colorlab** y disponibles para los alumnos como *materiales complementarios*. Las sesiones demostrativas consisten en experiencias de cátedra donde se presenten efectos visuales, o son sesiones interactivas donde el profesor discute con los alumnos la construcción o uso de un modelo. En este caso la clase va descubriendo cuales son los parámetros razonables que hay que usar a la vista de los resultados que se van obteniendo. La idea es que los estudiantes vean que las herramientas computacionales pueden ayudarles a comprender los fenómenos. No obstante, el uso de estas herramientas no sea el objetivo central de esta asignatura. Se hace un uso *dirigido* por parte del profesor.

Sesiones de laboratorio. En estas sesiones, de 5 horas cada una, tienen tres partes: (a) una primera parte introductoria, (b) una parte de medidas experimentales, y (c) una parte final dedicada a introducir los métodos que deben utilizar para analizar los datos o aplicar los modelos para comprender cuantitativamente los resultados. A pesar de que, desde el punto de vista instrumental, estas prácticas son de tipo *cerrado*⁷, se hace reflexionar a los estudiantes sobre el hecho de que el diseño experimental no les es ajeno y se les indica que en futuras asignaturas abordarán no solo el análisis de los resultados sino también la construcción de los estímulos y el diseño del experimento. En esta asignatura es donde, por primera vez en la materia, se puede abordar el punto (c) de conexión cuantitativa entre los experimentos y las teorías. Esta última parte es la que requiere un trabajo más activo por parte de los estudiantes.

5.10. Evaluación

La evaluación se hará con los siguientes criterios (sobre 10 puntos):

- 6 puntos: por un examen escrito, con cuestiones teórico-prácticas.
- 2 puntos: los ejercicios propuestos (en seminarios y laboratorio) y realizados por el alumno durante el curso, como evaluación continua.
- 2 puntos: por la memoria del trabajo realizado en el laboratorio.

La calificación necesaria para aprobar la asignatura será de 5 puntos, con el requisito de obtener un mínimo del 40 % del máximo alcanzable en cada uno de los apartados. La asistencia a las sesiones de laboratorio es obligatoria. Los estudiantes entregarán ejercicios resueltos relacionados con el análisis de los datos medidos en el laboratorio para las tres prácticas, pero solo habrán de presentar una memoria completa para una de las prácticas.

Se fijarán las fechas límite para la entrega de los ejercicios con suficiente tiempo de antelación. Los alumnos que no hayan entregado los problemas resueltos, en las

⁷Como se detalla en el capítulo 4, distingo entre prácticas de carácter *cerrado* respecto de prácticas o ejercicios de carácter *abierto*. En las de carácter *cerrado* los estudiantes no construyen desde cero los estímulos ni programan el método experimental.

fechas establecidas, o no hayan superado la nota de corte, tendrán derecho a un examen de problemas en la segunda convocatoria. Las memorias de las prácticas deberán ser entregadas en la fecha establecida al inicio del curso. Los alumnos que no hayan entregado las memorias, o no hayan superado la nota de corte, tendrán derecho a un examen de prácticas en la segunda convocatoria.

Capítulo 6

Guía docente de la asignatura “Visión de Formas y Color”

6.1. Datos identificativos

Nombre de la Asignatura	Visión de Formas y Color
Nombre de la Materia	Percepción Visual: mecanismos y aplic. clinic.
Nombre de la Titulación	Grado en Óptica y Optometría
Créditos ECTS	4.5
Periodo de impartición	4o curso, 7o cuatrimestre
Carácter	Optativo

6.2. Resumen

Se presenta el fenómeno de la visión como un proceso de extracción de información a partir de las imágenes que se forman en el plano imagen del sistema de adquisición, en nuestro caso, las imágenes retinianas. El objetivo de este proceso es la representación de la información de manera que se puedan resolver problemas de identificación de objetos. En este proceso, los sensores que se aplican a la señal de entrada (neuronas del LGN y V1) son extractores de características, y el comportamiento de ellas determina que información es retenida y cual es eliminada. En este contexto, el rol de características tales como bordes, texturas y colores es esencial. El curso consta de dos grandes bloques: (1) el análisis de la visión de texturas, y (2) el análisis de la visión del color. El curso introduce el material necesario para la caracterización lineal de los sensores de bordes y texturas en V1. También se presenta su comportamiento no lineal, relacionado con la adaptación al contraste. En cuanto al color, se presentan las limitaciones de la colorimetría triestímulo lineal, dando paso a la consideración de las dimensiones perceptuales de los estímulos cromáticos y del comportamiento no lineal de los modelos que explican la apariencia del color. Al final del curso los estudiantes conocen los elementos básicos de un modelo sencillo de observador espacio-cromático que puede aplicarse a imágenes reales.

6.3. Objetivos generales

Los resultados del aprendizaje son los siguientes. Comprensión del fenómeno de la visión como un proceso de representación de la información que permita la clasificación. Comprensión del rol de los bordes, las texturas y la descripción invariante del color para la identificación de objetos. Análisis de sistemas lineales espacialmente invariantes en el dominio de Fourier. Comprensión del papel de los filtros pasa-banda para la identificación de bordes y la caracterización de texturas visuales. Modelización de los sensores de V1 como un conjunto de filtros pasa-banda con adaptación al contraste. Cálculo de umbrales de contraste a partir del conjunto de respuestas de filtros pasa-banda. Reconocimiento de invariancias en las dimensiones perceptuales del color e identificación de las limitaciones de la colorimetría triestímulo lineal. Conocimiento de los elementos básicos de los modelos de apariencia del color. Elaboración y manejo de un modelo de observador espacio-cromático.

6.4. Destrezas

- CE165** Conocer como se adapta el sistema visual al nivel de iluminación y a la cromaticidad de la luz.
- CE166** Conocer como se adapta el sistema visual al contenido frecuencial (espacio-temporal) de escenas complejas.
- CE167** Conocer la arquitectura y función de las áreas del cortex extraestriado con participación relevante en la percepción visual, así como sus interacciones.
- CE168** Conocer la forma en la que se integra la información de las diversas dimensiones perceptuales para la realización de juicios sobre la escena.
- CE169** Conocer y manejar modelos avanzados de visión (no lineales y/o integrados por elementos pertenecientes al córtex extra estriado).

6.5. Conocimientos previos

Es necesario haber cursado “Psicofísica de la Visión” (de 2o) y “Mecanismos y Modelos de la Visión” (de 3o).

6.6. Temario y planificación temporal

Esta asignatura cubre cuatro grandes bloques temáticos centrados en la parte *computacional* de la Percepción Visual (frente a las aproximaciones *psicofísica* o *fisiológica* de asignaturas previas). No obstante, como el objetivo principal es que los estudiantes trabajen cuantitativamente con los modelos de texturas y color introducidos previamente en *Mecanismos y Modelos de la Visión*, las clases magistrales estándar y los seminarios son en realidad una introducción para plantear cinco *Ejercicios* que los estudiantes irán resolviendo con la ayuda del profesor en aula de informática.

A continuación se muestran los bloques temáticos con su duración total (en negro) así como las horas dedicadas a seminarios en grupos reducidos (en rojo).

- Tema 1: La visión como un problema de transmisión de información y elaboración de conceptos 10h 2h
- Tema 2: Distorsión en LGN y detección de bordes en V1 10h
- Tema 3: Sensibilidad frecuencial, enmascaramiento y visibilidad de distorsiones 10h
- Tema 4: Modelos de adaptación cromática y procesado espacial de los canales cromáticos 15h 3h

Los *Ejercicios* que los estudiantes abordan en clase como trabajo tutelado dentro de esos bloques temáticos son los siguientes:

- E0. Introducción a la programación en **Matlab**.
- E1. Estadística de imágenes naturales: el color en espacios LMS y ATD.
- E2. Control de las propiedades espacio-cromáticas en imágenes.
- E3. Aplicación de un conjunto de sensores (de LGN o V1) a la componente acromática de una imagen.
- E4. Visibilidad de patrones en modelos con respuesta no-lineal al contraste.
- E5. Implementación del Spatial CIE Lab: compensación del cambio de iluminante y simulación de anomalías espacio-cromáticas.

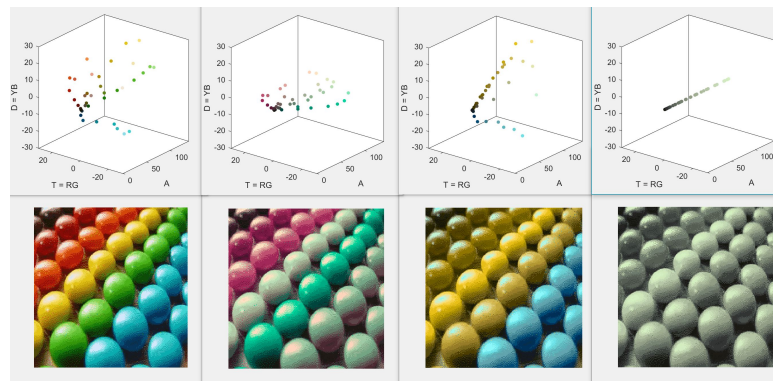
Y los seminarios en grupos reducidos dentro de esos bloques temáticos son estos:

- Tema 1. 1h. Dimensionalidad del espacio de representación y capacidades de clasificación: el ejemplo de los dicrómatas.
- Tema 1. 1h. Demo: funcionamiento de un clasificador basado en detección de contornos (utilizando sensores de tipo V1) y medida de la claridad.
- Tema 4. 3h. Demo: adaptación cromática bajo cambio de iluminante y algoritmo de pares correspondientes.

La forma en como se intercala temporalmente la teoría, las demostraciones en grupo reducido y la ejecución de los ejercicios por parte de los estudiantes se detalla en la descripción de los temas que listo a continuación.

Tema 1.**La visión como un problema de transmisión de información y elaboración de conceptos 10h 2h**

- 1.1** Sensores, características y dimensionalidad: dicromacias.
- E0** Introducción a la programación en **Matlab**.
- 1.2** Elementos de un clasificador: características y fronteras de decisión.
- 1.3** Problemas en el diseño de un clasificador:
 - Extracción de características para transmisión de información: jerarquía y redundancia.
 - Extracción de características para el éxito en la clasificación: separabilidad e invariancias.
 - Aprendizaje de la estadística de las clases.
- E1** Estadística de imágenes naturales: el color en espacios LMS y ATD.
- 1.4** El clasificador de Bayes: información a priori y modelos de los objetos.
- 1.5** Un clasificador biológicamente plausible (formas y color): descriptor de forma via contornos de Gabor y luminancia relativa (claridad).



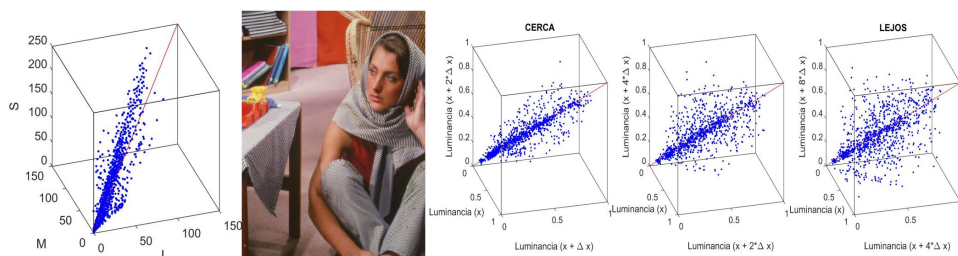
Aquí se introduce el detalle del concepto más novedoso que se trata en esta asignatura: el estudio de la Percepción Visual puede hacerse atendiendo a los objetivos funcionales de la misma, y no solo mediante el estudio de las propiedades fisiológicas de un sistema biológico concreto. Por ello es el tema que tiene más horas de clase expositiva tradicional. Este concepto solo se había citado en el tema introductorio de la asignatura de “Mecanismos y Modelos de la Visión”, pero aquí se analiza el tipo de problemas que se plantean desde esta aproximación.

El curso se abre con un seminario / experiencia de cátedra (basada en **Colorlab**) en la que se simula (y comprende) la percepción de anómalos cromáticos realizando reducciones de dimensionalidad en un espacio cromático oponente de los estudiados en “Mecanismos y Modelos de la Visión”. Esta experiencia ejemplifican conceptos

como el de *sensor* (e.g. los fundamentales LMS), *extracción de características* operando con las respuestas de los sensores (e.g. las características de *luminosidad*, *A*, y *cromaticidades*, *T* y *D*); y la relevancia de la *dimensionalidad del espacio de representación* para poder ejecutar tareas de clasificación.

A continuación se plantea el primer *Ejercicio* de la asignatura¹: **E0 Introducción a Matlab**. Aunque este es el único ejercicio no estrictamente relacionado con la materia, como ocurre al aprender cualquier lenguaje o herramienta de carácter instrumental (sea la gramática o las matemáticas), este es un *aro* por el que hay que pasar. En este ejercicio se aprovecha cualquier ejemplo irrelevante para combinar todos estos conceptos: ficheros **.m*, el *path* y el editor de *Matlab*, tipos de variables, bucles, condiciones, entrada y salida de datos y ejecución de una gráfica. Hecho esto, los alumnos están en disposición de *apreciar* lo que son las *toolboxes* *Vistalab* y *Colorlab*, con las que trabajarán el resto del curso.

En este tema se tratan los elementos que integran un sistema de clasificación a partir de sensores visuales y la problemática asociada. Básicamente las cuestiones de (a) la extracción de características adecuadas para la transmisión de la información visual con eficiencia energética, (b) la extracción de características adecuadas para resolver el problema del reconocimiento de objetos, y (c) el cálculo de distancias y el aprendizaje de las fronteras de decisión. Se muestra también un ejemplo donde estos criterios de diseño son contradictorios. Finalmente, se plantea la solución Bayesiana del problema y en un seminario se muestra un ejemplo de clasificador basado en descriptores de la forma obtenidos con sensores de Gabor (como los que hay en V1) y en un descriptor de luminancia relativa (claridad) similar a los usados en modelos avanzados de visión del color.

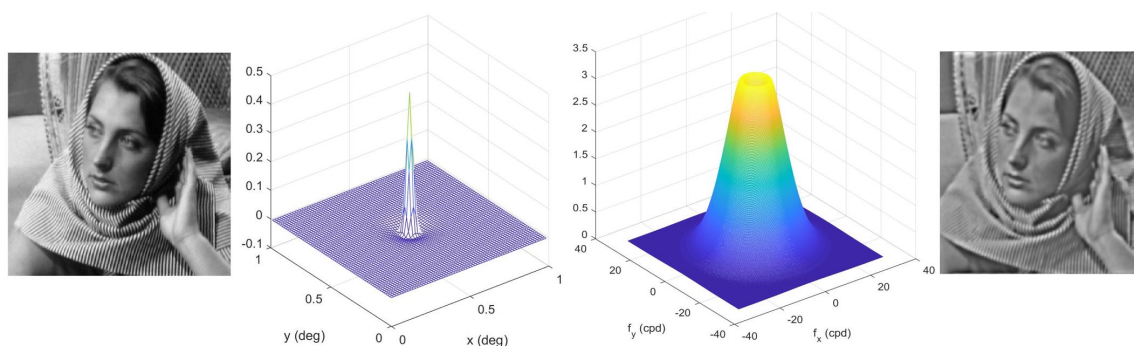


El segundo *Ejercicio* de la asignatura (el primero con contenido de *Percepción Visual*) es el **E1 Estadística de Imágenes Naturales** donde se toma una imagen cualquiera, se expresan sus colores en una representación LMS (retiniana) y en una base ATD (en el LGN), y se observan dos resultados interesantes: (1) esta transformación reduce fuertemente las redundancias entre las respuestas cromáticas, y (2) las dependencias entre las respuestas se reducen al aumentar la distancia espacial entre los receptores considerados. Este ejercicio implica el uso de ciertas funciones de *Matlab* y *Colorlab* que se explican a los alumnos en un formulario específico. *imread.m*, *imagesc.m*, *startcol.m*, *true2pal.m*, *tri2val.m*, bucle sobre posiciones espaciales y *plot3.m*.

¹Como se detalla abajo, esta asignatura optativa se estructura entorno a 6 ejercicios que los alumnos resuelven en clase y se evalúa fundamentalmente a través de los resultados presentados por los alumnos.

Tema 2.**Distorsión en LGN y detección de bordes en V1 10h**

- 2.1** Imágenes definidas en dominios discretos. Frecuencias de muestreo y dominio de Fourier.
- 2.2** Control del color, la luminancia media y el contraste.
- E2** Construcción de estímulos de propiedades espacio-cromáticas controladas.
- 2.3** Conjunto de campos receptivos y convolución.
- E3** Aplicación de un conjunto de sensores (de LGN o V1) a la componente acromática de una imagen.

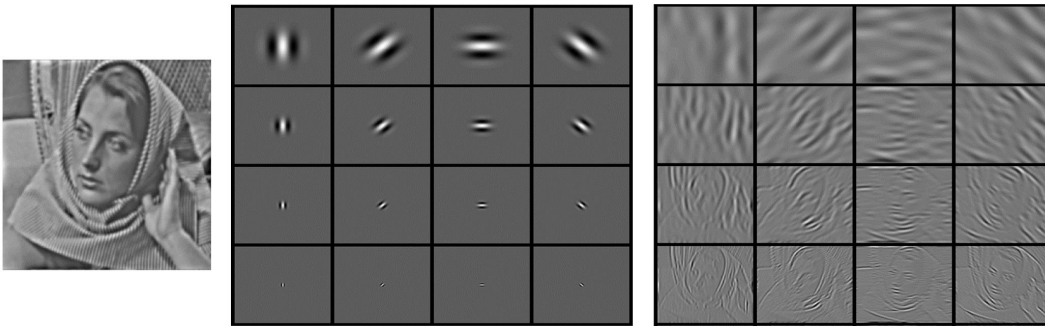


En este tema se trata primero el control (o el análisis) de las propiedades espacio-cromáticas de los estímulos visuales que se quieran utilizar (en la teoría o en la experimentación). En este contexto, hay dos aspectos fundamentales que controlar: (a) el calibrado colorimétrico y (b) el calibrado espacial. El primero hace referencia a la expresión de las imágenes en valores triestímulo, y el segundo hace referencia al apropiado control del tamaño subtendido y del contenido frecuencial de la imagen.

En sistemas informáticos (los únicos con los que es posible trabajar en la práctica), dichas cuestiones se reducen a entender como controlar dichos aspectos en imágenes digitales. Las *toolboxes* `Colorlab` y `Vistalab` solucionan estas cuestiones. Por un lado, las funciones `true2pal` `tri2val` `val2tri` `pal2true` y `transf_color_image` permiten trabajar con imágenes digitales true-color standard y expresarlas en cualquier base triestímulo, operar con ellas y volver a representaciones digitales visualizables mediante `imagesc`. Además se puede visualizar el contenido de color en diagramas cromáticos y espacios triestímulo utilizando `colordgm` y `colorspc`. Por otro lado, la función `spatio_temp_freq_domain` genera dominios discretos espacio-temporales en unidades con sentido visual (grados subtendidos y segundos), y con correcto control del muestreo espacio-temporal (en ciclos/grado y hertzios). Estos dominios pueden usarse para definir sobre ellos cualquier variación espacio-temporal de valores triestímulo y generar una secuencia controlada y visualizable usando `implay`. Además devuelve los dominios frecuenciales correctos para expresar en ellos transformadas de Fourier de la señal (obtenidas con `fft` y `ifft`) y visualizarlas con `mesh` o `imagesc` (en el caso espacial) o con `show_fft3` (en el caso espacio-temporal). Por

último, `control_lum_contrast` impone cierto valor medio (del valor triestímulo correspondiente) y cierto contraste RMSE en cualquier imagen natural. En el siguiente **Ejercicio E2 Construcción de estímulos de propiedades espacio-cromáticas controladas** distintos grupos de la clase abordan la generación de distintas imágenes utilizando dichas funciones.

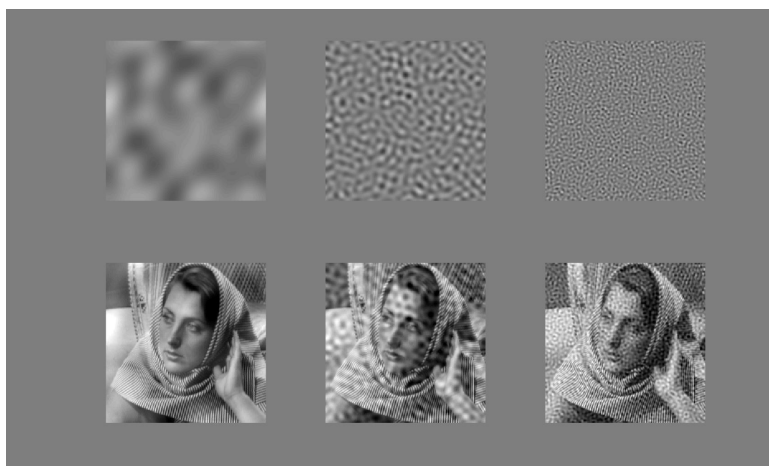
la última parte de este tema aborda la implementación de sistemas de sensores lineales con respuesta impulsional invariante a desplazamientos espaciales. En la introducción al ejercicio correspondiente se recuerdan las tres aproximaciones descritas (pero no suficientemente entendidas) en “Mecanismos y Modelos de la Visión”: (a) formulación matricial explícita (que permite el caso espacialmente variante), (b) convolución (filtro en el dominio espacial), y (c) filtro en el dominio de Fourier.



El siguiente **Ejercicio, E3 Aplicación de un conjunto de sensores a la componente acromática de una imagen** aborda estas cuestiones para sensores de LGN y de V1. En primer lugar se revisan los parámetros razonables para este tipo de sensores en las funciones `sens_lgn3d_space` `sens_gabor3d_space` `sens_gabor3d_freq` y posteriormente se aplican al tipo de imágenes construidas en el ejercicio anterior mediante `conv2`, `fft2` e `ifft2` o un bucle donde se construye explícitamente la matriz del sistema lineal. Esta matriz eventualmente representará una convolución si los campos receptivos son invariantes a desplazamientos.

Tema 3.**Sensibilidad frecuencial, enmascaramiento y visibilidad de distorsiones 10h**

- 3.1** Funciones de Sensibilidad al Contraste.
- 3.2** No-linealidades en la percepción del contraste.
- E4** Visibilidad de patrones en modelos con respuesta no-lineal al contraste.

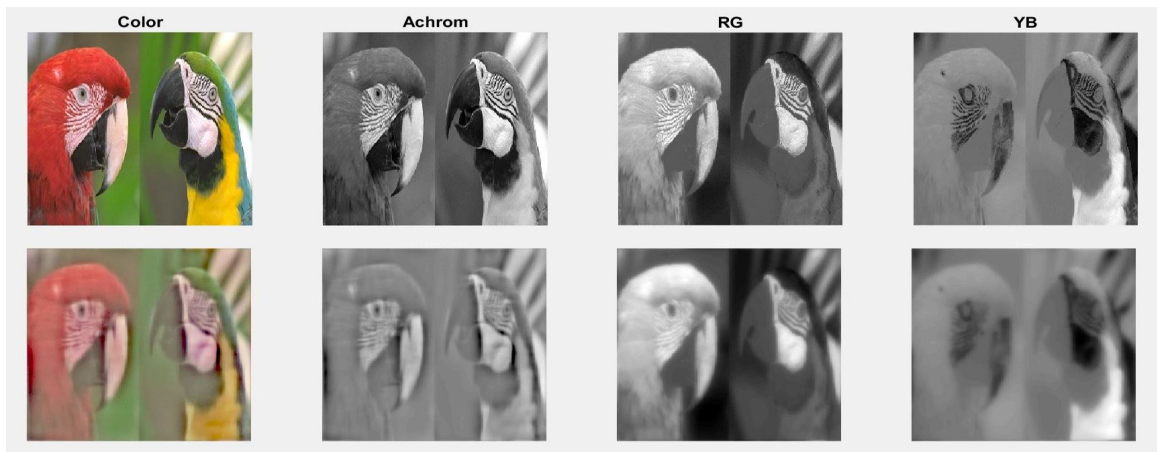


En el planteamiento del *Ejercicio E4: Visibilidad de patrones en modelos con respuesta no-lineal al contraste*, se revisan los conceptos de función de sensibilidad al contraste, CSF, relacionado con la función filtro asociada a los sensores del LGN vistos en el tema anterior; y se repasa el concepto de enmascaramiento producido por la no-linealidad de la respuesta al contraste.

En el *Ejercicio* los estudiantes construyen patrones *acromáticos* de distinta frecuencia y contraste (para una luminancia media fija) utilizando funciones de **Vistalab** conocidas en ejercicios anteriores. Estos patrones pueden combinarse con fondos de distinto contraste mediante **combine_test_background**. A continuación se propone la construcción de dos modelos alternativos de visión espacial (cada uno de ellos ejecutado por la mitad de la clase). El primero de ellos consiste en aplicar la CSF acromática como cuello de botella (utilizando **csfsso** de **Vistalab**) y posteriormente aplicar un modelo aproximado de enmascaramiento (por ejemplo una no-linealidad saturante fija, tipo raíz cuadrada). El segundo modelo consiste en aplicar un banco de filtros pasa banda del tipo que hay en V1 (utilizando un bucle sobre los valores razonables para la función **sens_gabor3d_freq** de **Vistalab**), pesando su norma según su frecuencia, y aplicar después la raíz cuadrada correspondiente a la saturación. Finalmente, en ambos casos, la visibilidad del test sobre el fondo se calcula aplicando una suma cuadrática a las diferencias de respuesta en el caso (i) fondo aislado y (ii) fondo+test. Se comparan las curvas de visibilidad obtenidas para diferentes contrastes del test, diferentes frecuencias, y diferentes contrastes del fondo; contrastando su plausibilidad con la *sensación* de distorsión que se tiene al mirar las imágenes.

Tema 4.**Modelos de adaptación cromática y procesamiento espacial de los canales cromáticos 15h 3h**

- 4.1** Modelos de adaptación cromática.
- 4.2** Aplicación de modelos de adaptación cromática y apariencia del color (CIE Lab).
- 4.3** Transformación de imágenes en color a espacios cromáticos oponentes.
- E5** Implementación del Spatial CIE Lab: compensación del cambio de iluminante y simulación de anomalías espacio-cromáticas.



Este tema se inicia con un seminario en el que se revisa la experiencia de cátedra que se utilizó en el tema 2 de “Mecanismos y Modelos de la Visión” para ilustrar el fenómeno de la adaptación cromática bajo cambio de iluminante. La diferencia es que, en este caso, se entra al detalle del código de la demostración: se iluminan muestras Munsell de *chroma* y *claridad* constantes en un círculo que recorre todos los ángulos de tono utilizando para ello dos iluminantes con diferente composición espectral. Se revisa el aspecto visual de las muestras, el comportamiento de la representación CIE xy de los colores y el comportamiento de la representación CIE Lab.

Como introducción al último *Ejercicio* se revisa como se pueden construir e iluminar imágenes espectrales en *Colorlab* utilizando *tri2spect* y *spect2tri*, y como se pueden obtener los canales CIE Lab en imágenes utilizando *xyz2lab* y las ya conocidas *imread*, *true2pal* y *pal2true*. Finalmente en el *Ejercicio E5 Implementación del Spatial CIE Lab: compensación del cambio de iluminante y simulación de anomalías espacio-cromáticas* se utilizan las funciones de *Vistalab* necesarias para filtrar no solo el canal acromático, *csfsso*, sino también los canales cromáticos *a* y *b*, *csf.chrom*. En este ejercicio se insta a los alumnos a calcular *imágenes correspondientes* tanto bajo cambio de iluminante, como bajo anomalías en alguna de las CSFs.

6.7. Bibliografía

■ Bibliografía básica y generalista

- M. Fairchild. Color Apperance Models. Wiley, 2013
- P. Capilla et al. Fundamentos de Colorimetría. Ed. Univ. Valencia 2002
- P. Capilla et al. Ciencia y Tecnología del Color. Ed. Univ. Valencia 2002
- P. Capilla Percepción Visual: Psicofísica, Mecanismos y Modelos. Ed. Interamericana 2018
- Transparencias de clase. Ayudas y Demos de Colorlab y Vistalab.

■ Bibliografía complementaria. Específica por temas y ejercicios.

Tema 1 La visión como un problema de transmisión de información y elaboracion de conceptos

- Introducción a **Matlab**: tutoriales disponibles en el aula virtual.
- Clasificador basado en contornos y claridad [88] (capítulo 2).
- Diferencia entre extracción de características para transmisión de información respecto de clasificación [89] (capítulos 9 y 10).

Tema 2 Distorsión en LGN y detección de bordes en V1.

- Campos receptivos en LGN [70] y ayuda de **Vistalab** para la función específica²
- Campos receptivos espaciales en V1 [41, 90] y ayuda de **Vistalab** para las funciones específicas³

Tema 3 Sensibilidad frecuencial, enmascaramiento y visibilidad de distorsiones

- Funciones de sensibilidad al contraste: acromática [15], cromáticas [18], del Observador Espacial Estandar [59], espacio-temporal [16, 60]. Ayudas de **Vistalab** para las funciones correspondientes⁴.
- Material complementario (archivos *.m comentados) del seminario de filtros de Mecanismos y Modelos de la Visión.

Temas 4 Modelos de adaptación cromática y procesamiento espacial de los canales cromáticos

- Información sobre el Spatial CIELAB [91].
- Pares correspondientes y anomalías espacio-cromáticas [92, 93].

²sens_lgn3d_space.m

³sens_gabor3d_space.m y sens_gabor3d_freq.m

⁴csfsso.m y csf_chrom.m

6.8. Volumen de trabajo

En la consideración del volumen de trabajo se ha tenido en cuenta un periodo lectivo cuatrimestral de 15 semanas. La equivalencia es de 1 crédito ECTS/25h de trabajo del alumnado, lo que supone un total de 112h de volumen de trabajo total. Considerando una presencialidad del 40 %, como se indica en el Plan de Estudios, las actividades presenciales representan un total de 45h.

Actividad	Descripción	Horas
Clases teóricas de grupos reducido	Seminarios con demos teórico-prácticas (experiencias de cátedra y simulaciones)	5
Clases teórico-prácticas	Introducción a los Ejercicios	15
Clases prácticas	Trabajo tutelado sobre los Ejercicios en aula de informática	25
Estudio de fundamentos teóricos	Estudio de conceptos para la resolución de los Ejercicios	15
Realización de trabajos	Ejecución y experimentación fuera del aula con los Ejercicios propuestos	45
Tutorías individuales y colectivas	Consulta puntual de dudas y cuestiones	7
TOTAL (trabajo presencial + autónomo)		112

6.9. Metodología docente

Como se pone de manifiesto por el reparto de las cargas de trabajo y la organización temporal, así como por la descripción de los bloques temáticos organizados entorno a *Ejercicios* de carácter *abierto*, la metodología de esta asignatura optativa está muy determinada por la intención de que los alumnos usen los elementos computacionales de los modelos para resolver problemas concretos.

A diferencia de la asignatura obligatoria descrita en el capítulo anterior, donde la exposición de la teoría requiere un sesgo hacia la clase magistral, desde el establecimiento de esta asignatura optativa la hemos centrado en el trabajo autónomo del estudiante, difuminando las fronteras entre las sesiones de teoría y las de laboratorio ya que esta asignatura se imparte íntegramente en aula de informática.

la exposición de los contenidos se organiza entorno a la resolución de seis ejercicios de carácter *abierto*. Estos ejercicios, que cuentan con diferentes variantes que son abordadas por distintos grupos de la clase, son discutidos con los estudiantes y resueltos en sesiones tuteladas en las que aprenden a hacer simulaciones con los elementos de los modelos de Percepción Visual que hemos desarrollado en Matlab: Colorlab y Vistalab.

Sesiones de teoría y seminarios. Las clases *dirigidas* por el profesor según el modelo de lección magistral o para la realización de demos / experiencias de cátedra,

son en realidad el método para introducir el material necesario para poder plantear cada uno de los *Ejercicios*.

Sesiones prácticas. En estas sesiones se aborda la resolución tutelada de los *Ejercicios* que se van proponiendo a lo largo del curso. Estos *Ejercicios* son de carácter *abierto*. Se trata de abrir la caja negra que representaban los *materiales complementarios* computacionales o el software para experimentos que se proporciona al estudiante en la asignatura *Mecanismos y Modelos de la Visión*. Mientras que en aquel caso (por falta de tiempo) los estudiantes se encuentran con paquetes *cerrados* que (en su caso) ejecutan de forma ciega para ilustrar los fenómenos, en estas sesiones prácticas se pretende introducir a los estudiantes en el uso de los elementos que les permiten construir estímulos y aplicar modelos de forma autónoma.

6.10. Evaluación

Se ofrecen dos métodos de evaluación: el método regular (Método 1) y el método excepcional (Método 2).

Debido a la organización de esta asignatura optativa entorno a la resolución de *Ejercicios* computacionales en el aula, la opción de evaluación regular (Opción 1) considera obligatoria la asistencia a las sesiones presenciales y gran parte de la nota depende del trabajo de los estudiantes en estas sesiones presenciales. Alternativamente, como opción para los estudiantes que no asistan con regularidad a las sesiones presenciales se ofrece un mecanismo excepcional de evaluación (Opción 2). El detalle de los métodos de evaluación que se proponen es el siguiente:

Opción 1: Evaluación basada en la realización de los ejercicios prácticos propuestos (requisito necesario para aprobar) y examen teórico-práctico adicional (voluntario) para subir nota.

- A** Entrega de los ejercicios numéricos propuestos (65 % de la nota final).
- B** Asistencia regular a las sesiones presenciales teórico-prácticas y a los seminarios demostrativos (5 % de la nota final).
- C** Examen de cuestiones teórico prácticas (30 % de la nota final).

El cumplimiento de los apartados A y B (asistencia y realización de los ejercicios) es el requisito necesario para aprobar según esta Opción 1. De lo contrario se evaluará según la Opción 2.

Opción 2: Evaluación basada en examen. Para los alumnos que decidan no asistir regularmente a las sesiones ni presenten los ejercicios, se propone una evaluación exclusivamente basada en el examen de cuestiones teórico-prácticas.

Apéndice A

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 un capítulo anterior: como una disciplina de carácter cuantitativo, con una cierta elaboración matemática) en la Diplomatura de Óptica y Optometría de la Universitat de València¹.

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).

A.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 mucho² me dió una definición humorística de *ciencia* que él tomaba muy en serio (y a mi me dejó bastante afectado por un tiempo):

¹Este texto data del año 2002 cuando el actual Grado en Óptica y Optometría de 2018 era una diplomatura universitaria. No obstante, estimo que las consideraciones que se hacían entonces aun siguen vigentes.

²Philippe Refregier, Professeur de la Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille.

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):

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 definición³, 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 interesantes⁴.

³Sobre todo entre aquellos filósofos de la ciencia que son físicos o matemáticos [94].

⁴Siempre 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 [95]), Gabor (Teoría de la Información [96]), Shannon (Teoría de la Información [97]), Wiener (Cibernética: Biología + Teoría de la Información [98]), Schrödinger (Métricas no euclídeas de espacios cromáticos [37]), Von Neumann (arquitecturas para el procesado de la información [99]), Feynman (reconoció la percepción como un ingente problema no resuelto [100]), 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 [101]).

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 [102] y Khun [103]), 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).

Por lo menos, para otro autor al uso (Feyerabend, partidario de la *proliferación* como método [104]), esta inconsistencia quizá no sea un problema grave si al final algún estudiante acaba aprendiendo algo distinto de cero.

A.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.

A.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 Física⁵ 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 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!).

A.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.

A.5. ¿Qué opciones nos quedan?

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

⁵Por ejemplo en la asignatura de Física de la Visión impartida por este Departamento.

■ 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 analítica⁶, convendría poner el énfasis en que los alumnos fuesen capaces de usar alguna herramienta de software para resolver ese problema⁷.
Si se consiguiera que los alumnos adquieran 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 título⁸.

⁶Por ejemplo la solución de transformadas de Fourier.

⁷Por ejemplo, en MATLAB, el cálculo de la transformada de Fourier de una imagen, *i*, es tan fácil como escribir: `I=fftshift(fft2(i));`.

⁸Por 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*.

A.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 sí mismos los conceptos expuestos en las sesiones teóricas.

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 conciencia 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 convengan 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 Topología⁹, 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).

A.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:

⁹Los que se encargan de dar las Matemáticas de la Diplomatura de Óptica y Optometría.

- 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.
- Aumentarían las posibilidades de que las diferentes asignaturas correspondientes a esta materia modificaran su carácter (por ejemplo de *obligatorias* a *op-tativas*) 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.

A.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.

Apéndice B

Proyecto de Investigación

En este apéndice incluyo las líneas generales del proyecto de investigación que lidero y que acaba de aprobarse en la última convocatoria del Ministerio de Economía y Competitividad.

Se trata de un proyecto coordinado (en colaboración con el Centre de Visió per Computador de la Universitat Autònoma de Barcelona), y por lo tanto no exclusivamente personal. No obstante, me parece adecuado incluirlo aquí para enfatizar la estrecha relación que existe entre la investigación que desarrollo en Neurociencia Visual Computacional y la docencia que planteo en la materia de Percepción Visual.

El título *oficial* del proyecto es: ***Deep Networks in the Visual Brain: from Measurements to Algorithms***, con referencia MINECO DPI2017-89867.

B.1. Resumen

Comprender el procesamiento de la información visual en el cerebro humano es un reto importante en la era de la comunicación digital por dos motivos: (a) introducir el factor humano en el ciclo de diseño es crítico para optimizar sistemas de transmisión de imágenes, y (b) el aprendizaje estadístico en visión por computador induce sensores artificiales que comparten propiedades con sensores biológicos. De hecho, las soluciones artificiales más exitosas (convolutional deep nets) son capas de neuronas naturales simplificadas. Este proyecto se centra en la dinámica neuronal de la visión biológica no presente en las redes artificiales habituales: magnificación cortical, recurrencia cortical, dinámica de Wilson-Cowan y Normalización Divisiva adaptativa. A pesar de que estas no-linealidades todavía no se comprenden en detalle, nuestros equipos han mostrado que son necesarias para explicar un amplio rango de observaciones psicofísicas (saliencia, enmascaramiento de contraste y frecuencia, post-efectos de movimiento, inducción de luminosidad y color, constancia de color, adaptación espacio-cromática y dicromacia). Estas manifestaciones son clave para mejorar la experiencia del usuario en tecnologías de visualización de imágenes. Los modelos precisos de visión humana son clave para abordar los problemas de calidad de imagen subjetiva, estética computacional y malestar visual, que tienen conexiones obvias y amplia aplicación tecnológica. Por ejemplo, modelos recientes en transferencia de estilos artísticos y en predicción de calidad de la imagen utili-

zan arquitecturas *deep* convolucionales, lo que remarca la relevancia de los modelos de bajo nivel del *pathway* retina-corteza. El malestar visual, un desencadenante de migrañas, está relacionado con la resonancia inducida en los mismos mecanismos corticales que también se modelizan en soluciones al problema de calidad de imagen sin referencia. Entender qué información se descarta en estas capas neuronales es clave para definir estímulos subjetivamente equivalentes, y para imitar o evaluar el estilo artístico. Caracterizar la información descartada (por ejemplo, mediante la reconstrucción de la señal) también está conectado a otro tema candente: la decodificación de la señal neural o lectura del cerebro visual. Existen evidencias convergentes que indican que el mismo tipo de modelos no lineales (p.ej. Normalización Divisiva) se puede utilizar en diferentes niveles de resolución (desde neuronas individuales hasta voxels fMRI y psicofísica), y la solución estacionaria de modelos dinámicos puede estar también relacionada con estas no-linealidades adaptativas. Combinando nuestra experiencia experimental en psicofísica visual, neuroimagen y modelado computacional, el proyecto se dedicará principalmente a vincular y refinar los modelos no lineales del cortex visual comentados. Nuestro trabajo previo con modelos de percepción con aplicaciones en ingeniería (incluso conduciendo a patentes) garantiza que la investigación básica se convertirá en algoritmos prácticos en tres aplicaciones: (A) desarrollar métricas unificadas para la calidad de imagen y la estética visual, (B) predecir malestar y la migraña desencadenada por estímulos visuales, y (C) mejorar la decodificación del cerebro visual usando la información del modelo de codificación, desestimada por los enfoques actuales de aprendizaje puramente automático. La transferencia tecnológica se realizará con las diversas empresas y entidades que colaboran en el proyecto (Xerox Labs Europe, Quibim SL, y los Hospitales La Fe de Valencia y la Vall d’Hebron de Barcelona).

B.2. Origen del equipo de investigación

Esta propuesta reúne a dos grupos (el Equipo de Neurociencia Visual del Grupo de Procesamiento de Imágenes y Señales¹ de la Univ. Valencia, y el Grupo de Neurocomputación y Visión Biológica² del Computer Vision Center de la UAB) que comparten el interés en la visión humana. Más importante aún, ambos grupos siguen un enfoque experimental y computacional combinado, que es inusual en la comunidad científica de la visión en nuestro país. Trabajamos con modelos y herramientas similares, y nos esforzamos por aplicarlos al procesamiento de imágenes y la visión por computador. Por ejemplo, hemos estado trabajando juntos en la Red Temática de Excelencia “NeViComp” en Neurociencia Visual y Visión Computacional; y un miembro de cada equipo (X. Otazu y J. Malo) han trabajado juntos en el comité CIE T-8-12 sobre calidad de imagen perceptual. Además, ambos equipos tenían proyectos previos MINECO-EXPLORA en estética visual basada en la percepción usando diferentes técnicas experimentales (psicofísica y fMRI) que ahora convergen. Por estas razones, la coordinación apareció como la solución óptima para una retroalimentación fructífera entre los equipos.

Específicamente, en esta propuesta cada uno de los paquetes de trabajo experi-

¹<http://isp.uv.es>

²<http://www.cvc.uab.cat/neurobit/>

mentales complementarios proviene de cada subproyecto (psicofísica principalmente de CVC-UAB y fMRI principalmente de UV), mientras que el trabajo teórico es compartido por ambos subproyectos. El valor añadido de la coordinación es tener acceso a resultados sobre el mismo problema provenientes de diferentes técnicas experimentales. De hecho, algunos objetivos y tareas no podrían alcanzarse sin una colaboración conjunta. Por último, pero no menos importante, un proyecto conjunto reducirá los costos económicos porque se compartirán muchos recursos.

B.3. Modelización actual del cerebro visual

B.3.1. Consideraciones generales

El interés del procesamiento de la información visual humana en la era de la comunicación digital visual es doble: práctico y teórico. Desde un punto de vista práctico, la optimización de los sistemas de imágenes destinados a los espectadores humanos obviamente requiere introducir el factor humano en el ciclo de diseño. Por ejemplo, en 2015, el Premio Emmy de la American Television Academy (el mayor reconocimiento de la industria multimedia a la comunidad de ingenieros) fue para los autores del Structural SIMilarity index (SSIM) [105]. Al anunciar el premio, la Academia dijo que “SSIM es ahora una medida de calidad de video perceptual ampliamente aceptada, utilizada para probar y refinar la calidad de video en toda la industria global de televisión por cable y satélite, y afecta directamente la experiencia de decenas de millones de espectadores día a día”. Por otro lado, desde el punto de vista teórico, resulta intrigante que las soluciones de aprendizaje automático para problemas de visión por computador conduzcan a sensores artificiales que comparten propiedades fundamentales con sensores biológicos, como campos receptivos de creciente abstracción a lo largo de la vía visual [106,107]. De hecho, las capas convolucionales y la sumación sobre familias de sensores en Convolutional Nets (la arquitectura más exitosa en visión artificial hoy en día) están directamente inspiradas en las nociones clásicas de células simples y células complejas en neurociencia visual, y la arquitectura general es reminiscente de la jerarquía LGN-V1-V2-V4-IT en la vía ventral de la corteza visual [108]. Sin embargo, las etapas no lineales en las redes convolucionales son versiones simplificadas de sus equivalentes biológicos. Mientras que las redes artificiales utilizan sigmoides fijas en cada dimensión, en la cascada de transformaciones lineales + no lineales en el cerebro, las etapas no lineales dependen de la activación de los sensores vecinos. Una formulación ampliamente aceptada de esta interacción adaptativa es la llamada Normalización Divisiva, que es omnipresente en todas las modalidades sensoriales [22]. En [109,110] mostramos que esta no linealidad adaptativa también puede verse como la solución estacionaria de la dinámica cortical guiada por las ecuaciones de Wilson-Cowan [111,112].

Este proyecto se centra en las distintas propiedades de la visión biológica no incluidas en las redes neuronales artificiales convencionales como, por ejemplo, la recurrencia y la dinámica intracortical [113–116], la dinámica de Wilson-Cowan [112,117], y la Normalización Divisiva [22,118,119]. A pesar de que estas no linealidades aún no se comprenden completamente, recientemente contribuimos a demostrar que son fundamentales para explicar una amplia gama de fenómenos visuales (por ejemplo, saliencia [120–122], contraste y enmascaramiento de frecuencia [123–125], postefectos

de movimiento [67], postefectos de luminosidad e inducción cromática [116, 126–128], constancia del color [129, 130] adaptación espacio-cromática [131, 132], dicromacia [133] y predicción del malestar visual [134–136]. Y todos estos hechos psicovisuales son clave para mejorar la tecnología de imagen orientada a los humanos.

De hecho, nuestra motivación para modelar la vía neuronal visual está impulsada por tres problemas aplicados vinculados a los mecanismos de bajo nivel y su efecto en psicofísica y neuroimagen: (a) la estética visual computacional [137] y su conexión a la calidad de imagen subjetiva [138, 139], (b) las molestias visuales y migrañas, que están obviamente conectadas [136, 140], y (c) la decodificación de la señal neuronal o lectura del cerebro visual [141, 142]: nótese que la comprensión de qué información se descarta a lo largo de las capas neuronales (por ejemplo, a través de decodificación) también es fundamental para definir metámeros visuales (estímulos subjetivamente iguales) [143], y para imitar y evaluar el estilo artístico [144, 145].

Un ejemplo ilustrativo del enfoque práctico y teórico de la visión humana de bajo nivel que señala el punto de partida de esta propuesta es la comparación en la predicción de rendimiento de calidad de imagen entre el algoritmo que recibió el premio Emmy 2015 mencionado anteriormente [105, 146], y el de nuestra red profunda biológicamente plausible, sintonizada psicofísicamente [125] (ver Fig. B.1).

B.3.2. Algunos problemas aplicados

(A) Estética visual y transferencia de estilo artístico. Históricamente, el problema de predecir los juicios estéticos en los observadores humanos se ha abordado desde varias disciplinas, con un énfasis relativamente moderno en el vínculo entre la estética, la percepción y la función cerebral [151–155]. Sin embargo, la complejidad del problema ha limitado nuestro progreso y es solo recientemente que los modelos unificadores de la experiencia de la estética visual (por ejemplo, el propuesto por Redies [137] pueden permitirnos aplicar un enfoque más reduccionista. El modelo de Redies distingue dos modos de procesamiento: perceptual que se basa en “propiedades intrínsecas” y cognitivo en “información contextual”. Las propiedades intrínsecas se refieren a características procesadas principalmente por mecanismos cerebrales ascendentes localizados en toda la corteza visual que son universales entre los humanos. La información contextual (como la intencionalidad, la presentación, la historia previa y otras circunstancias) se procesa mediante mecanismos cognitivos parcialmente descendentes que varían entre los individuos de acuerdo con su experiencia personal / cultural. El procesamiento en estos dos canales es en gran medida independiente y su interacción con los centros emocionales del cerebro determina en gran medida el resultado de las decisiones de juicio estético. Tal enfoque es extremadamente conveniente desde el punto de vista computacional ya que nos permite separar el problema en porciones más pequeñas y tratables. En este proyecto en particular, solo consideraremos el nivel de procesado de la forma intrínseca.

Las propiedades de nuestra maquinaria perceptual y cognitiva están estrechamente relacionadas con las propiedades estadísticas del entorno visual [124, 132, 156–159]. En un contexto antropológico, la producción y apreciación de la belleza se ha explicado en términos evolutivos como una forma de atraer la atención de otros miembros de la especie [160]. En el cerebro humano, la apreciación estética está mediada por mecanismos sensoriomotores, emocionales y cognitivos y activa áreas relacionadas

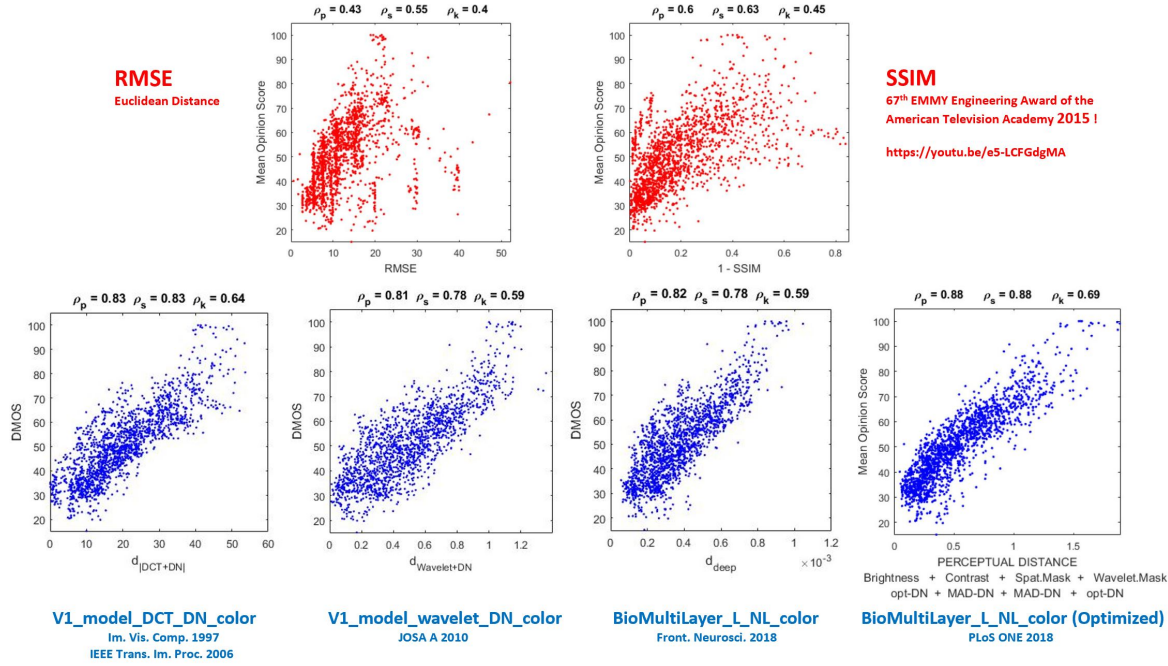


Figura B.1: Correlación entre la calidad visual subjetiva experimental (Mean Opinion Score, en el eje de ordenadas) y la calidad predicha (en el eje de abscisas) usando diferentes métricas de distorsión de imagen: la distancia Euclídea (arriba a la izquierda), el SSIM premiado con el Emmy en 2015 arriba a la derecha [146], y nuestras distancias perceptuales [69, 74, 125, 147, 148] (abajo). Estas soluciones exitosas a este problema comercialmente interesante se basan en dos avances teóricos: (a) la arquitectura convolucional que usa no linealidades de Normalización Divisiva en oposición a las ConvNets convencionales, y (b) los parámetros han sido aprendidos psicofísicamente a través del método de Máxima Diferenciación [149, 150] a diferencia del aprendizaje supervisado convencional a través de la retropropagación en tareas de clasificación de imágenes.

con las emociones y la recompensa [161], y los juicios estéticos probablemente involucren circuitos cerebrales aún más ampliamente distribuidos [162, 163]. También hay evidencia de un área independiente de la modalidad localizada en la corteza orbito-frontal media que puede ser activada por estímulos visuales musicales y visuales [154]. Independientemente de su complejidad, los mecanismos neuroestéticos son jerárquicos (como casi todas las demás estructuras cerebrales) y pueden descomponerse en subsistemas de componentes estables [164], que han sido estimulados por artistas de todas las épocas para obtener diferentes efectos visuales para su música y pinturas [165, 166]. Es precisamente esta modularidad lo que hace que el problema se pueda tratar a través de un enfoque de modelado computacional.

El enfoque reduccionista propuesto en [137] ya ha sido formulado por los teóricos [151, 152] y demostrado en una serie de publicaciones que vinculan las preferencias con las estructuras de imágenes de tipo fractal y la sensibilidad visual [167, 168].

La “forma intrínseca” de valor estético (libre de información contextual) está

estrechamente relacionada con el problema de calidad de imagen sin referencia en el que se pide a los observadores que evalúen la calidad de una imagen distorsionada sin una imagen original para comparar [169]. Los enfoques más exitosos para predecir la opinión de los espectadores humanos miden cómo la imagen considerada se aparta de las estadísticas de las imágenes convencionales (por ejemplo, una menor respuesta de los sensores de alta frecuencia en las imágenes borrosas). Tanto la extracción de características utilizada para representar las imágenes (la arquitectura sensorial) como el tipo de medidas estadísticas sobre la respuesta poblacional seleccionada (p. Ej. Covarianza, medidas de divergencia) son fundamentales para predecir la opinión de los observadores [170, 171]. La visibilidad de esta desviación de las estadísticas regulares se relaciona con el concepto de metámeros de textura, que son estímulos físicamente diferentes pero perceptualmente equivalentes porque provocan respuestas de las mismas estadísticas [143]. Finalmente, la estadística de las respuestas de las arquitecturas de redes profundas convencionales (por ejemplo, la covarianza de la señal en diferentes capas) también son fundamentales para transferir el estilo artístico de la imagen fuente a la imagen objetivo [144, 145].

Todos los ejemplos anteriores implican que la estadística de la respuesta de una arquitectura sensorial apropiada captura tanto la esencia de la textura y el estilo artístico como su calidad percibida. Las mejoras en la arquitectura del modelo objeto de este proyecto conducirán a avances en todas estas aplicaciones conectadas.

(B) Inducción de estrés visual. Existe evidencia de que ciertos estímulos visuales pueden provocar una variedad de síntomas y distorsiones perceptivas, un fenómeno a menudo denominado “estrés visual” [172–177] (por ejemplo, fig.B.2). Los efectos adversos van desde molestias simples y distorsiones perceptivas, como colores y formas alucinatorias, hasta síntomas como fatiga visual, dolores de cabeza y migraña, e incluso convulsiones en pacientes con epilepsia fotosensible [172, 175, 178–181]. La estadística espacio-cromática de tales estímulos visuales es diferente de la del entorno visual natural [182] cuya energía de Fourier permanece aproximadamente constante en todas las escalas espaciales que se expresa generalmente como una relación $1/f^2$ donde f representa la frecuencia espacial. Varias investigaciones teóricas [124, 132, 159, 182, 183] y psicofísicas [157, 184] sugieren que nuestro sistema visual ha evolucionado para procesar estas estadísticas naturales que se ajustan de manera óptima al estructura piramidal de la corteza estriada (V1) y que permite un consumo óptimo de energía metabólica. La conexión entre la estadística de escenas naturales y el estrés visual fue realizada recientemente por nuestro grupo [135, 136, 185] donde demostramos que una simple medida de actividad cortical basada en codificación eficiente y sensibilidad visual humana explica una gran parte de la correlación entre las imágenes de prueba, sus calificaciones de incomodidad correspondientes y su probabilidad de desencadenar un ataque de migraña. Predecir qué patrones causarán incomodidad visual es importante porque los patrones aversivos, aunque raros en el mundo natural, prevalecen en el entorno urbano moderno y tienen consecuencias negativas para el bienestar [134, 135, 140]. En este trabajo, proponemos algunas formas simples de predecir y prevenir los efectos adversos del diseño visual.

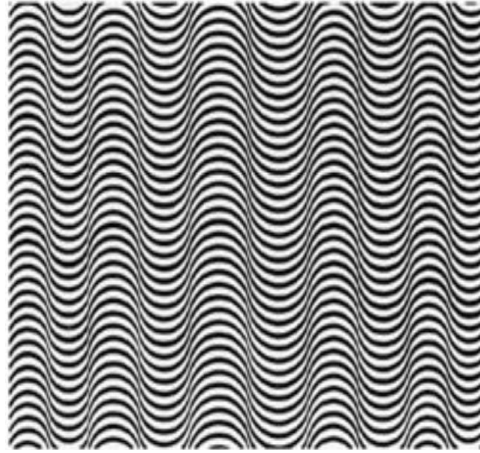


Figura B.2: Un ejemplo de un patrón que causa incomodidad visual en la población general y puede desencadenar migrañas en observadores hipersensibles, o incluso ataques epilépticos en los observadores con epilepsia fotosensible [140].

(C) Decodificación del cerebro visual. Los problemas científicos descritos anteriormente dependen del modelo de codificación de la ruta retino-talamico-cortical y la descripción de la estructura estadística de la respuesta cortical. Comprender y eventualmente decodificar este código neuronal es un objetivo a largo plazo en la neurociencia visual computacional [53, 186, 187]. Este problema de inversión es particularmente interesante desde un punto de vista de procesamiento de información general ya que se ha demostrado que (1) los cálculos realizados por el cerebro visual son óptimos de acuerdo con varios criterios teóricos de información [67, 124, 131, 132, 188–192] y observaciones experimentales [157]; (2) se ha demostrado que un uso restringido del modelo conocido de procesamiento de información visual en el cerebro humano es útil en la codificación de imágenes y video, ya sea como base de codificadores JPEG y MPEG [193, 194] como así como para mejorar el rendimiento de estos estándares [123, 195–199]. La inversión específica de las señales de la vía visual podría verse como un caso particular de Brain Machine Interface [200] donde se debe recuperar cierta información de las respuestas neuronales.

El objetivo a largo plazo de la decodificación visual del cerebro podría verse como una nueva herramienta de transmisión de imágenes en la que la etapa de extracción de características adaptativas no triviales es realizada por un cerebro humano en lugar de por el algoritmo de compresión convencional. La señal (de entrada) debe reconstruirse (desde la señal neuronal) en el receptor. Los avances recientes en la reconstrucción de imágenes a partir de señales neurales directas (lectura del cerebro y decodificación de los sueños) utilizan técnicas ciegas de aprendizaje automático [141, 142, 200]. Estos son resultados prometedores, pero su naturaleza de caja negra que no tiene en cuenta la transformación de codificación no proporciona información sobre la forma real en que funciona el sistema. En este caso, las herramientas convencionales incluyen (i) técnicas de regresión lineal y técnicas kernel utilizadas en [201] y [202] respectivamente, y (ii) decodificación e inferencia bayesianas, utilizadas en [141]. Tenemos experiencia en el uso de estas herramientas en otras aplicaciones, a saber,

la regresión del kernel para compresión de imágenes [67, 196, 203, 204]; e inferencia bayesiana para la estimación de la reflectancia bajo iluminación desconocida [205] y bajo ruido desconocido [206, 207].

Las mejoras importantes en la decodificación deberían provenir de incluir el conocimiento sobre la transformación de codificación en las técnicas de lectura cerebral convencionales, por ejemplo a través de la inversa analítica de dichos modelos de codificación. Otra vía por explorar es mejorar la estimación bayesiana a través de mejores técnicas de estimación de PDF.

B.4. Limitación de los enfoques actuales

Modelos computacionales de la vía visual: un panorama amplio e inconexo. Un siglo de investigación en fisiología y psicofísica ha revelado la complejidad de la formidable maquinaria que comunica la retina con la corteza visual, y la relación de las respuestas en esta cascada de capas neurales con los fenómenos que realmente vemos [2]. A partir de esta investigación, existe un consenso sobre la ubicuidad de ciertos mecanismos neuronales canónicos que realizan convoluciones y no linealidades adaptativas [22]. Las cascadas de estas operaciones lineales + no lineales canónicas y la suma apropiada de estas respuestas explican las tendencias básicas de la visión del color [4, 5, 208], la percepción de la textura [64, 65, 209], y la percepción del movimiento [73, 210]. Hemos participado en dicho debate proponiendo modelos para predecir *saliency* [120], cambios en la sensibilidad de contraste percibida debido al contexto [69, 190], movimiento ilusorio [67], cambios en el brillo percibido y color debido al contexto [116, 126–128], constancia de color [130, 205, 211, 212] adaptación de campos receptivos cromático-espaciales debido a cambios en la iluminación [131, 205], o modelos para simular la percepción dicromática [133] y otras deficiencias visuales [213, 214].

Sin embargo, la escena está lejos de ser clara como lo ilustran problemas básicos, tales como: (1) *resolución*: no existen conexiones computacionales claras entre los diferentes niveles de resolución del problema (por ejemplo, conectar los modelos a nivel de circuito y a nivel de comportamiento); (2) *dispersión*: los modelos suelen estar demasiado apegados a hechos experimentales específicos, por lo que la comunidad de neurociencia visual actualmente tiene una variedad de modelos dispersos que son difíciles de unificar, y (3) *abstracción*: no está claro cómo en el cerebro se forman los conceptos visuales abstractos a partir de primitivas de bajo nivel. Como resultado, dado un problema aplicado, los elementos de la caja de herramientas de la neurociencia visual deben recombinarse, refinarse y perfeccionarse para dar cuenta del comportamiento específico de la aplicación.

Ejemplos de estas dificultades son los modelos de organización de los sensores corticales (autoorganización, mapas de selectividad de orientación, *pinwheels*, etc.). Algunos de ellos [215, 216] se definen como un conjunto bastante preciso de conexiones de feedforward y feedback entre las capas que constituyen el área V1, pero su aplicabilidad para reproducir la dinámica de la actividad de las células V1 es algo limitada. Otros [217, 218] derivan esta conectividad como resultado de un proceso dinámico, pero no están diseñados para trabajar sobre imágenes y videos reales, y no está claro como pueden dar lugar a efectos de comportamiento. Los modelos de Grossberg (p. Ej., LAMINART [219, 220]) definen una organización columnar y

laminar de la corteza visual en términos de conexiones excitadoras e inhibitoras, pero, a pesar de su interés conceptual, LAMINART es difícil de reproducir dado que muchos de sus conexiones se describen de manera demasiado general y no se proporciona ninguna implementación computacional. Finalmente, la ventaja funcional de esta organización fisiológica específica no se entiende bien [221], y las explicaciones clásicas de esta organización basadas en la maximización de la información [222] han demostrado ser erróneas [223].

Por otro lado, se han propuesto diferentes descripciones dinámicas para las interacciones intracorticales (por ejemplo, las de Li [114] y de Wilson-Cowan [53, 112, 117]). Aunque el modelo de Li reproduce algunos aspectos de la *saliency* de bajo nivel, solo funciona con estímulos visuales muy simples y muy limitados, y [116] lo extendieron para que funcionase con cualquier imagen natural. Los estudios sobre los efectos psicofísicamente comprobables de los modelos de Wilson-Cowan son escasos [224], y todavía faltan extensiones del modelo de Li para acomodar el color, el movimiento o la disparidad. Y finalmente, la equivalencia final entre estos modelos dinámicos y su conexión a modelos de interacción más estáticos como la Normalización Divisiva no se ha establecido.

Debido a la multiplicidad de los modelos y la falta de una descripción detallada de sus propiedades matemáticas (por ejemplo, centrarse en la transformación pero no en sus Jacobianos, que son fundamentales en los esquemas de aprendizaje), estos algoritmos no se han aplicado todavía en redes convolucionales.

Estética visual: bases de datos sesgadas y modelos ad-hoc. Aunque se han logrado algunos avances importantes en la predicción del valor estético de las escenas visuales, la mayoría de los enfoques de aprendizaje automático no tienen en cuenta los modelos biológicos [225–231], por ejemplo, extracción de características visuales ad-hoc como la “regla de los tercios” [226, 228, 229], o características básicas como distorsión de la imagen [169], distribución espacial de los bordes, borrosidad, histogramas de tono y luminosidad [228], composición [229], etc. En la mayoría de los casos, la gran variabilidad de las valoraciones de los usuarios conduce a grandes errores de predicción [226, 232] y hace que sea muy difícil confirmar si un nuevo método representa una mejora sobre el estado del arte. Esta es una consecuencia directa del uso de *groundtruths* ricos en términos semánticos (como la popular competencia “dpchallenge” [231, 233]) que contiene una mezcla de fotografías, arte de diversos temas y calidad, objetos altamente “emocionales”, etc. Además, estos conjuntos de datos presentan una deficiencia importante: la mayoría de los contribuyentes envían sus imágenes para ganar los diferentes concursos, generando asimetría en términos de estética: incluso las peores imágenes pueden tener algún mérito estético. Por otro lado, las imágenes de Internet etiquetadas como “feas” son así debido a un gran componente semántico. Esto genera desequilibrios en las bases de datos lo cual es un reto fundamental para los algoritmos de aprendizaje.

Por otro lado, en los modelos *deep* para la descripción y transferencia del estilo artístico [144, 145], las medidas de la estructura de las respuestas tienen cierta relación con las utilizadas en las descripciones perceptivas del metamerismo de la textura [143]. Sin embargo, los pesos dados a las medidas estadísticas provenientes de diferentes capas de la red no están justificados, y las medidas mismas han sido seleccionadas ad-hoc.

En resumen, el “contenido semántico” no controlado y el rango dinámico limitado de los *groundtruth* estéticos actuales limitan severamente su utilidad en el aprendizaje automático. Esta propuesta comienza reconociendo estos problemas y presentando una estrategia para abordarlos.

Inducción de estrés visual: ausencia de modelos biológicamente plausibles. Los enfoques computacionales existentes para predecir las molestias visuales [140, 234–236] se basan en el principio fundamental de que los sistemas visuales han evolucionado para percibir de forma óptima el entorno a través de la presión selectiva [156, 158, 237]. Las caracterizaciones computacionales de estímulos visuales incómodos [135, 136, 140, 175, 235] se basan en una cuantificación matemática de la desviación de las estadísticas $1/f^2$ de escenas naturales usando el análisis de Fourier [18]. En un intento reciente, evaluamos la actividad de un modelo computacional mecanicista de V1 en respuesta a varios conjuntos de imágenes acromáticas [136, 185] que explican aproximadamente el 40 % de la varianza en las calificaciones de incomodidad de los observadores, que es mucho más alto que cualquier otro modelo computacional. Aunque todas estas arquitecturas computacionales no incluyen el procesamiento del color, se ha demostrado que son fundamentales para comprender las molestias visuales [177], por lo tanto, es muy probable que incluir el color en el modelo aumente su poder predictivo.

Los ataques de migraña dependen de varios factores diferentes (hoy en día, algunos de ellos siguen siendo desconocidos) [180, 181] pero uno de los más importantes es el estímulo visual. Como se dijo anteriormente, se sabe que los estímulos visuales incómodos son los responsables de desencadenar ataques de migraña. De hecho, se sugiere que uno de los factores clave en la migraña es un funcionamiento anormal de las células inhibitoras, aunque no existe un consenso total entre los investigadores sobre si es un déficit de actividad inhibitora de las células o un exceso de respuesta de las células excitadoras. Además, ningún algoritmo computacional puede reproducir los mecanismos neuronales observados (cambios en las bandas de gamma EEG) durante los estados preictal e ictal de un ataque de migraña [238–240] o las manifestaciones cognitivas perceptivas (orientación selectividad, sensibilidad al movimiento, efectos secundarios diferentes, etc.) [241]. Mostramos que un modelo computacional de tasa de disparos puede predecir la influencia de una imagen para inducir un ataque de migraña [136] pero la banda gamma (además de la alfa y beta) no puede ser reproducida por modelos de velocidad de disparo sino solo por modelos de redes emergentes [242]. Por esta razón, uno de los objetivos de este proyecto es implementar la arquitectura de conexiones laterales ya presente en nuestro modelo de tasa de disparos [116] en una arquitectura de red de punta de múltiples capas de corteza visual primaria que considera simultáneamente konio, parvo y vías magno-celulares

Dado que la percepción del color (incluida la inducción del color) comparte los mecanismos neuronales con la migraña (principalmente los procesos inhibitorios), planteamos la hipótesis de que los pacientes con migraña mostrarán una diferencia mensurable en la percepción del color en comparación con los sujetos control. Esta será una señal importante para comprender (y medir) cómo se altera la percepción visual en migraneurs. Además, nuevos resultados no publicados [243] muestran que la inducción cromática depende en gran medida de la información acromática (es decir, las vías visuales konio y magnocelulares dependen de la actividad de la vía

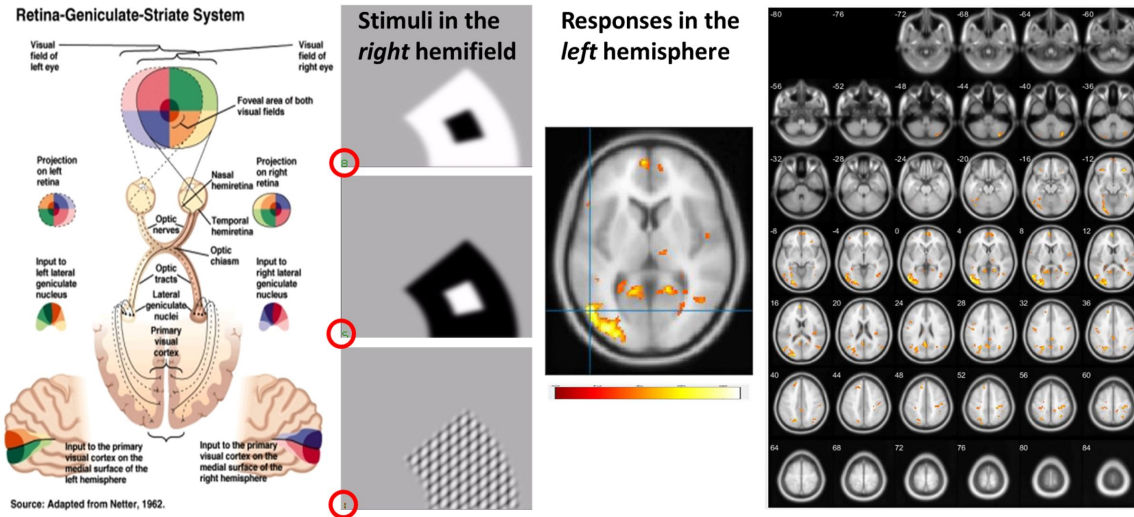


Figura B.3: Un ejemplo de nuestra calibración input-output del sistema de adquisición fMRI (3 Teslas) con el que trabajamos en la Unidad de Radiología Experimental del Instituto de Investigación Sanitaria La Fe (Hospital La Fe de Valencia).

parvocelular). Nadie ha realizado un estudio detallado (ni con migrañeros ni con sujetos normales) de esta dependencia.

Decodificación del cerebro visual: Un inconveniente principal de los métodos de inversión convencionales para la decodificación del cerebro visual es que solo se basan en enfoques supervisados (regresión, inferencia empírica) basados en el registro de múltiples pares de entrada-salida (pares estímulo-respuesta) [141, 142, 200–202]. Estos métodos de decodificación no explotan la estructura conocida del sistema de codificación [244]. Como la adquisición de respuestas de fMRI para la estimulación conocida consume mucho tiempo, las bases de datos son pequeñas y ruidosas. Como resultado, los métodos de inversión convencionales sufren problemas de generalización cuando se enfrentan a cambios importantes en las condiciones de observación. Además, la inferencia Bayesiana está limitada por el problema en la estimación empírica de las densidades de probabilidad condicionales. La figura B.4 ilustra los problemas de generalización de los métodos convencionales y los beneficios de la alternativa que proponemos: utilizar la inversa analítica de la transformación de codificación.

B.5. Alternativas que proponemos

Alternativas en modelos de córtex visual: unificación y validación experimental. Trabajaremos en el vínculo entre familias de modelos neurodinámicos de nivel de circuito (modelos de Li y Wilson-Cowan) y los modelos lineales + no lineales basados en la Normalización Divisiva que demostraron funcionar en un rango más

amplio de niveles de resolución (de neuronas individuales [119], a fMRI voxels [245] y psicofísica [64, 65]).

Recientemente, creamos una nueva arquitectura neurodinámica basada originalmente en el modelo de Li que incorpora pirámides de unidades sensibles a diferentes escalas espaciales, lo que permite simular la dinámica espacio-temporal de los estímulos acromáticos. Este modelo es capaz de reproducir varios fenómenos visuales como la inducción del brillo [116], la prominencia visual [121] y predecir con éxito la incomodidad visual [140, 185] con el mismo conjunto de parámetros. Ninguna de las arquitecturas anteriores modela el procesamiento del estímulo visual de color mediante células selectivas de color. Algunos efectos de inducción cromática fueron reproducidos por Cerda y Otazu [246] con una adición ad hoc de procesamiento color-oponente al modelo de Penacchio et al. [116]. Además, hemos demostrado que un modelo funcional simple de campos receptivos V1 que reproduce su respuesta en función del contraste del estímulo visual [247, 248] produce resultados de vanguardia en la constancia del color [130, 212] y detección de bordes [249, 250]. Paralelamente, hemos definido una arquitectura multicapa de velocidad de disparo de las vías konio y parvocelular en la corteza visual primaria [251] que modela las conexiones neuronales que producen los cambios en el campo receptivo observadas por varios autores [247, 248, 252]. Por lo tanto, tenemos un vínculo directo entre esta evidencia fisiológica, su mecanismo neuronal computacional subyacente asociado y su manifestación perceptiva, por ejemplo, la constancia del color [130]. La introducción de una etapa de color adecuada en nuestros modelos existentes (tanto neurodinámicos como basados en la Normalización Divisiva) es uno de los objetivos de este proyecto.

También tenemos resultados sobre la relación entre los parámetros dinámicos de la interacción Wilson-Cowan [111] con los parámetros de la interacción de la Normalización Divisiva [109, 110]. Estas relaciones analíticas justifican la similitud entre los efectos estadísticos de estas transformadas y permitirán un enfoque modular en la cascada de transformaciones lineales + no lineales.

Finalmente, siguiendo [74, 253] en todos estos desarrollos, prestaremos especial atención a las derivadas de los modelos porque (1) el jacobiano respecto de la señal es relevante para describir los efectos psicofísicos (métrica y sensibilidad), y (2) los jacobianos respecto de los parámetros son necesarios en los esquemas de aprendizaje basados en el descenso del gradiente y cuando los parámetros deben ajustarse para reproducir mediciones de psicofísica o fMRI.

Alternativas en estética visual: nuevos efectos y bases de datos. Las deficiencias actuales de las bases de datos sobre estética se abordaron mediante la selección de imágenes de bajo contenido semántico (imágenes de objetos naturales como rocas, árboles, paisajes, etc.) e incorporando nuevo contenido manipulado artificialmente para producir juicios estéticos bajos (“imágenes feas”) [254]. Los resultados preliminares han confirmado nuestra hipótesis de que restringir el contenido a imágenes sin semántica y ampliar el rango dinámico de nuestra base de datos sí mejora las predicciones del modelo y que nuestro paradigma es capaz de capturar las características de bajo nivel detrás de la estética basada en la percepción [255]. Sin embargo, todavía hay trabajo por hacer a este respecto. En primer lugar, es posible mejorar la precisión de los datos psicofísicos utilizando un paradigma de comparación por pares (en lugar de escalas de tipo Likert) y segundo, es posible explorar influencias de bajo

nivel para el juicio estético correlacionando respuestas de comportamiento a marcadores biológicos (tales como EEG / GSR / ECR / expresión facial) y movimientos oculares.

También hay evidencia experimental anecdótica y (preliminar) que apunta a un vínculo entre las manipulaciones estadísticas de segundo y tercer orden de escenas naturales que provocan juicios estéticos negativos fuertes y malestar visual [116,254].

En el presente proyecto, estas ideas se profundizarán en tres direcciones principales: (a) ampliaremos el alcance y la precisión de los datos psicofísicos recopilados realizando un experimento de juicio estético por pares siguiendo ideas psicofísicas bien establecidas [256]; (b) extraeremos un subconjunto de imágenes “extremadamente feas” y “extremadamente bellas” acordadas y las utilizaremos para obtener marcadores biológicos como EEG, GSR y respuestas de seguimiento ocular en condiciones controladas de un número menor de observadores; (c) aplicaremos una versión mejorada del modelo cortical incluyendo una descripción más sofisticada de los mecanismos de organización lateral en la corteza [116], del procesamiento opONENTE del color [246]; mecanismos de prominencia [121] y mecanismos de categorización de color de bajo nivel [257] para obtener una métrica computacional estética; (d) exploraremos la conexión entre los fenómenos aparentemente diferentes de baja respuesta estética y la incomodidad visual usando un enfoque combinado computacional / psicofísico, con especial énfasis en los mecanismos corticales de bajo nivel. Los experimentos (a) y (b) tienen diferentes objetivos: se usarán datos biométricos para mejorar el modelo neurodinámico actual y ajustar sus parámetros, y se usarán datos de comportamiento para entrenar una capa de aprendizaje de máquina de la métrica estética y probar sus predicciones. En vista de los resultados previos esperamos una mejora en la precisión y un alcance más amplio de los datos psicofísicos, la sofisticación del modelo cortical y las mejoras recientes en las técnicas de aprendizaje automático resultarán en avances claros en nuestra comprensión del problema y nuestra capacidad para predecir el comportamiento humano.

Alternativas en el problema del estrés visual: nuevas observaciones y establecimiento de puentes entre modelos. En un primer estudio, hemos analizado si un modelo biológicamente realista de la corteza visual puede reproducir la fenomenología de la incomodidad visual [135,140,185]. Su arquitectura está diseñada para representar las influencias contextuales inhibitorias de excitación en la corteza visual. Se basa en la anatomía y la fisiología de la corteza visual primaria (V1) y, adicionalmente, representa una mejora sobre arquitecturas previas capaces de modelar procesos que tienen lugar temprano en la vía visual, como la prominencia visual [114,258] y la inducción de brillo [116]. Usamos diferentes conjuntos de imágenes con juicios de incomodidad y evaluamos si las imágenes cómodas se procesaban con una actividad poblacional diferente y característica. En particular, verificamos si las imágenes cómodas se procesaban con una actividad dispersa, es decir, con unas pocas unidades disparando simultáneamente. Mostramos que las imágenes más cómodas están codificadas con una actividad más escasa, de acuerdo con el creciente cuerpo de literatura que relaciona la incomodidad visual y la respuesta hyperBOLD en la corteza visual [259–263]. El modelo explica alrededor del 40 % de la varianza en el juicio de incomodidad de los observadores [136].

Dado que un modelo de tasa de disparos no puede reproducir bandas alfa, beta

y gamma, uno de los objetivos de este proyecto es implementar la arquitectura de conexiones laterales presente en nuestro modelo de tasa de disparos [116] en una arquitectura multicapa de red primaria corteza que modela las vías koniocelular, parvocelular y magnocelular. Nos ayudará a comprender los mecanismos neuronales de la percepción del color, las molestias visuales y la migraña.

Además, por un lado, los nuevos resultados no publicados de los autores [243] muestran que tanto la inducción cromática estática como la dinámica dependen en gran medida de la información acromática (es decir, las vías visuales konio y magnocelulares dependen de la actividad de la vía parvocelular). Nadie ha realizado un estudio detallado (ni con *migranieurs* ni en sujetos de control) de esta dependencia. Por otro lado, dado que la inducción del color (o percepción del color) comparte mecanismos neuronales con la migraña (por ejemplo, el mecanismo neuronal inhibitorio), planteamos la hipótesis de que los migrantes mostrarán una diferencia medible en la percepción del color en comparación con sujetos normales. Es una clave importante para comprender y medir cómo la enfermedad de la migraña puede cambiar la percepción visual y comprender los mecanismos neuronales de la percepción del color y la migraña tanto en sujetos normales como anómalos.

Alternativas en la decodificación del cerebro visual: utilización de la inversa analítica. Como alternativa a los métodos de decodificación ciega, en este proyecto proponemos utilizar el conocimiento del modelo de codificación en la transformación de decodificación. Específicamente, se ha demostrado que una cascada de transformaciones lineales + no lineales basadas en la Normalización Divisiva reproduce la señal fMRI BOLD en la corteza visual [245]. Comenzamos a adaptar una arquitectura *deep* a las mediciones de fMRI del proyecto TIN2013-50520-EXP, y hemos estado trabajando en la inversa de la Normalización Divisiva durante mucho tiempo [123, 195]. Por lo tanto, tenemos las herramientas para aplicar la inversa analítica del modelo directo a las mediciones de fMRI en el problema de decodificación. La ilustración en la Figura B.4 (de [74]) muestra los beneficios de usar la inversa analítica con respecto a los métodos de regresión convencionales. En este ejemplo, la respuesta neuronal se simuló utilizando un modelo psicofísicamente ajustado que consiste en una cascada de 4 transformaciones isomórficas lineales + no lineales, que incluyen convoluciones y normalizaciones divisivas [74, 125, 253]. La señal de entrada incluía ruido de fotones, y la respuesta incluía tanto ruido neuronal como emborronamiento que simulaba la adquisición de fMRI. Los métodos convencionales (por ejemplo, decodificación a través de regresión lineal [201] y regresión no lineal del núcleo [202]) se entrenaron en condiciones de iluminación / contraste medio. Su rendimiento fue probado en una gama más amplia de condiciones de observación. Los resultados muestran que los métodos basados en la regresión ciega tienen problemas de generalización (véase cómo aumenta el error en situaciones que no se consideran en el entrenamiento, lejos de la condición de luminancia y contraste medio). Más interesante aún, la inversión analítica no solo generaliza mejor en un escenario más amplio, sino que también obtiene un error de decodificación más bajo incluso en la situación óptima para los métodos de regresión. Otra alternativa a los métodos de decodificación convencionales es mejorar la inferencia bayesiana mediante el uso de métodos acelerados de MonteCarlo. La decodificación bayesiana (como en [141]) reduce a maximizar la PDF condicional del estímulo dada la respuesta; donde la probabilidad

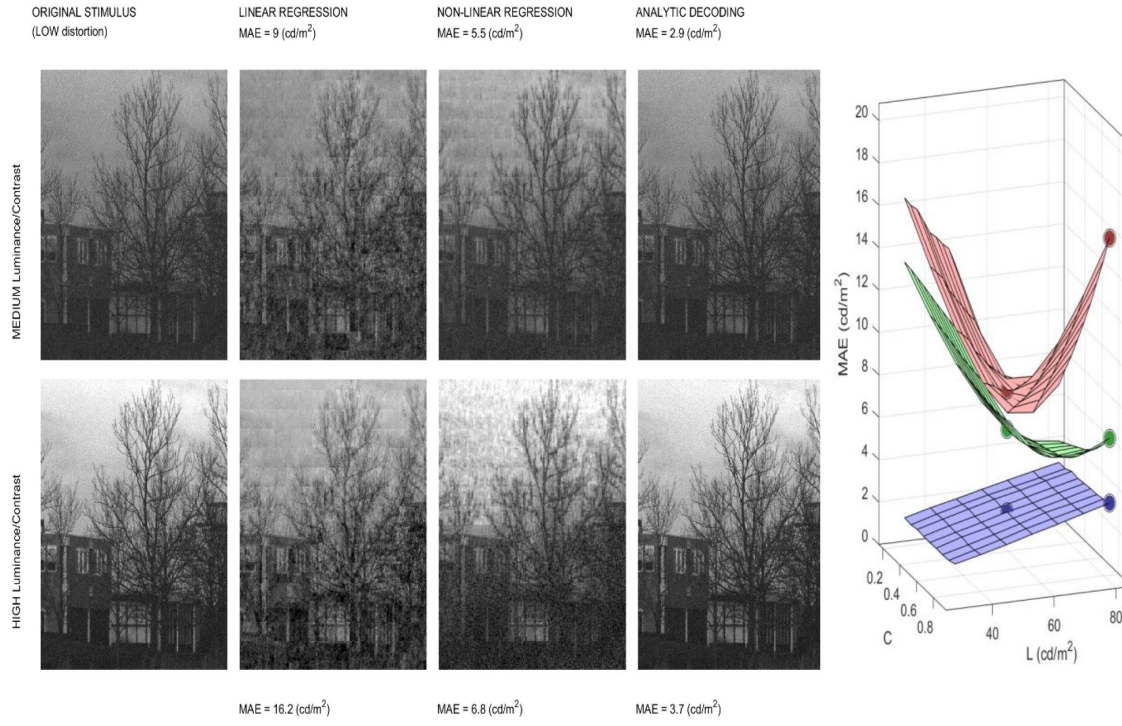


Figura B.4: Alternativas en decodificación del cerebro visual. Imágenes reconstruidas a partir de respuestas neuronales (simuladas) en dos casos: (fila superior) luminancia media y media, y alta luminancia (fila inferior) y alto contraste. La fila superior corresponde a las condiciones de entrenamiento. El panel de la derecha muestra el error de decodificación (Error Absoluto Medio en cd / m^2) para los métodos considerados: regresión lineal (rojo), regresión no lineal (verde) y la inversión analítica propuesta (azul). Los puntos resaltados en el centro corresponden a los errores de las condiciones de entrenamiento y el resto de las superficies corresponden a las condiciones de fuera de entrenamiento.

a priori es desconocida o difícil de calcular. En esta situación, uno se ve obligado a utilizar enfoques iterativos como Metropolis-Hastings para Markov Chain Monte Carlo (MCMC) [264] donde la distribución objetivo (desconocida) se aproxima iterativamente desde una densidad de propuesta. El problema es el período para lograr una convergencia adecuada, particularmente para un pequeño número de muestras, a costa de imágenes mal decodificadas. La posibilidad de acelerar la convergencia (y, por lo tanto, mejorar la reconstrucción) consiste en adaptar la densidad propuesta [265]. Para este fin, podemos usar nuestro método para la estimación de PDF multivariada basada en la gaussianización que usamos para la inferencia Bayesiana en la restauración de imágenes [207].

Nuestro enfoque distintivo: integración de teoría y experimento. Es importante destacar que esta propuesta sobre modelos de visión humana no es puramente teórica. La prueba experimental y la optimización de los modelos a través

de la validación apropiada en el laboratorio (psicofísica y registros fMRI) es una de las características distintivas del trabajo pasado de nuestros equipos. Este enfoque combinado es bastante único (a nivel nacional) en los grupos que trabajan con este tipo de modelos de visión. Recopilar nuestros propios datos experimentales es fundamental para tener una idea clara del resultado esperado de los modelos y su aplicabilidad a diferentes problemas prácticos. Además, el trabajo teórico también conduce a experimentos alternativos que podrían abrir nuevas líneas de investigación.

Por ejemplo, trabajar en el problema de decodificación usando la inversa analítica de arquitecturas lineales + no lineales puede proporcionar alternativas para obtener los parámetros de la red: en lugar de minimizar el error de las respuestas estimadas de la transformación directa y la respuesta registrada (enfoque estándar en [245]), los parámetros óptimos también podrían ser aquellos que minimicen el error de la entrada estimada a partir de la respuesta registrada y de la inversa analítica (nuevo enfoque). ¿Serán ambos enfoques equivalentes?. Otro ejemplo: nuestro trabajo teórico en la geometría perceptual del espacio de la imagen [69, 125] puede conducir a nuevas formas de generar imágenes distorsionadas en direcciones máximamente molestas (por ejemplo, siguiendo [149]) que pueden conducir a más experimentos informativos en estética y estrés visual.

B.6. Hipótesis y Objetivos científicos

Las principales hipótesis del proyecto son:

- A medida que la evidencia se acumula, queda claro que los mismos mecanismos de procesamiento cortical (de bajo nivel) juegan un papel determinante en ambos, dando forma a las preferencias estéticas visuales y provocando molestias visuales y migrañas. De forma similar, el conocimiento sobre la transformación de codificación por estos mecanismos corticales puede potenciar las técnicas de decodificación ciega.
- En los últimos años, hemos contribuido a demostrar que una descripción precisa de la flexibilidad de las etapas no lineales en cascadas de transformaciones lineales + no lineales es fundamental para comprender una gama de hechos psico-visuales. Estos modelos corticales a nivel de circuito también pueden ser útiles en redes artificiales.
- La familia de modelos dinámicos a nivel de circuito tiene que estar conectada a modelos tales como cascadas de normalizaciones divisivas que han demostrado dar cuenta de hechos no solo a nivel de circuito sino también a nivel de fMRI-vóxel y a nivel psicofísico.

Los objetivos científicos (objetivos generales y objetivos específicos por subproyecto) son:

- G1** Mejora de los modelos corticales actuales mediante la vinculación de los diferentes modelos neurodinámicos de las no linealidades a nivel de circuito con los modelos de Normalización Divisiva, incluidas las etapas de procesamiento de color biológicamente plausibles en las arquitecturas consideradas.

- G1a** Subproyecto UV: énfasis en modelos de tasa de disparo y dinámica de Wilson-Cowan
- G1b** Subproyecto de la UAB: énfasis en las redes de neuronas de sensibles al color
- G2** Sintonización y validación de los modelos a través de nuevos experimentos psicofísicos y registros de EEG y fMRI con nuevos estímulos sintéticos y naturales. La caracterización experimental a través de nuevas bases de datos incluirá la visibilidad de distorsiones, la evaluación de la incomodidad o el equilibrio visual, y su relación con el EEG y la respuesta neuronal fMRI. De especial interés es su conexión de los registros fisiológicos con la migraña.
 - G2a** Subproyecto UV: registro de fMRI con imágenes naturales y bases de datos de calidad de imagen (en primer lugar), y estética (de forma secundaria), y psicofísica de distorsiones visuales.
 - G2b** Subproyecto de la UAB: énfasis en medidas psicofísicas y EEG de estética y malestar visual y migraña
- G3** Utilización de los nuevos modelos corticales de actividad para desarrollar métricas unificadas de distorsión y estética de bajo nivel (sin semántica), métricas de calidad de imagen y predicción de molestias visuales y desencadenamiento de migraña (a través de la comprensión de los mecanismos neuronales detrás de las migrañas).
 - G3a** Subproyecto UV: mejora de las técnicas de transferencia de estilo artístico y de las métricas de calidad de imagen con y sin referencia.
 - G3b** Subproyecto de la UAB: desarrollo de métricas para la predicción del valor estético y la predicción de la activación de la migraña
- G4** Utilización de la inversa analítica de cascadas de capas neurales lineales + no lineales y la inferencia Bayesiana mejorada en la decodificación del cerebro visual.
 - G4a** Subproyecto UV. Brain reading: desarrollo de algoritmos de decodificación y reconstrucción de imágenes a partir de registros fMRI.
 - G4b** Subproyecto de la UAB: cuantificación de imágenes visualmente incómodas a partir de marcadores fMRI

Bibliografía

- [1] B.A. Wandell. *Foundations of Vision*. Sinauer Assoc. Publish., Massachusetts, 1995.
- [2] J.S. Werner and L.M. Chalupa, editors. *The New Visual Neurosciences*. MIT Press, 2014.
- [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] A. Stockman and D. H. Brainard. *The Optical Society of America Handbook of Optics*, volume III: Vision and Vision Optics, chapter Color vision mechanisms. OSA, McGraw Hill, 3rd edition, 2010.
- [5] M.D. Fairchild. *Color Appearance Models*. The Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology. Wiley, 2013.
- [6] J.G. Daugman. Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles. *Vision Research*, 20:847–856, 1980.
- [7] J.G. Daugman. Spatial visual channels in the fourier plane. *Vision Research*, 24(9):891–910, 1984.
- [8] A.B. Watson. The cortex transform: Rapid computation of simulated neural images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 39:311–327, 1987.
- [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] 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.
- [11] D.J Heeger. Model for the extraction of image flow. *Journal of the Optical Society of America A*, 4:1455–1471, 1987.
- [12] D.J Heeger. Optical flow using spatiotemporal filters. *International Journal of Computer Vision*, 1:279–302, 1987.

- [13] 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.
- [14] D.J. Heeger E.P. Simoncelli. A model of neuronal responses in visual area MT. *Vision Research*, 38:743–761, 1998.
- [15] F.W. Campbell and J.G. Robson. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 197:551–566, 1968.
- [16] D.H. Kelly. Motion and vision II: Stabilized spatiotemporal threshold surface. *Journal of the Optical Society of America*, 69(10):1340–1349, 1979.
- [17] D.H. Kelly. Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds. *Journal of the Optical Society of America A*, 73(6):742–749, 1983.
- [18] K. Mullen. The contrast sensitivity of human color vision to red/green and blue/yellow chromatic gratings. *Journal of Physiology*, 359:381–400, 1985.
- [19] M. Carandini and D. Heeger. Summation and division by neurons in visual cortex. *Science*, 264(5163):1333–6, 1994.
- [20] D. J. Heeger. Normalization of cell responses in cat striate cortex. *Visual Neuroscience*, 9:181–198, 1992.
- [21] 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.
- [22] M. Carandini and D. J. Heeger. Normalization as a canonical neural computation. *Nat. Rev. Neurosci.*, 13(1):51–62, Nov 2011.
- [23] Terence D Sanger. Stereo disparity computation using gabor filters. *Biological Cybernetics*, 59:405–418, 1988.
- [24] I. Ohzawa, GC. DeAngelis, and RD. Freeman. Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: neurons ideally suited as disparity detectors. *Science*, 249:1037–1041, 1990.
- [25] GC. DeAngelis. Seeing in three dimensions: the neurophysiology of stereopsis. *Trends Cognit. Science*, 4:80–90, 2000.
- [26] A.B. Watson. Efficiency of a model human image code. *Journal of Optical Society of America A*, 4(12):2401–2417, 1987.
- [27] 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.
- [28] 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.

- [29] P.C. Teo and D.J. Heeger. Perceptual image distortion. *Proceedings of the SPIE*, 2179:127–139, 1994.
- [30] K.R. Boff, L. Kaufman, and J.P. Thomas. *Handbook of Perception and Human Performance*. John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [31] 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.
- [32] G. Wyszecki and W.S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [33] J. Krauskopf and K. Gegenfurtner. Color discrimination and adaptation. *Vision Res.*, 32:2165–75, 1992.
- [34] L. Guth. Model for color vision and light adaptation. *Journal of the Optical Society of America A*, 8:976–993, 1991.
- [35] R.W.G. Hunt. *The Reproduction of Colour*. Fountain Press, London, 1995.
- [36] D.L. MacAdam. Specification of small chromaticity differences. *Journal of the Optical Society of America*, 33.
- [37] E. Shrodinger. Grundlinien einer theorie der farbenmetrik im tagessehen. *Ann. Physik*, 63:481–495, 1920.
- [38] C. Enroth-Cugell and J.G. Robson. The contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat. *Journal of Physiology*, 187:517–522, 1966.
- [39] 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.
- [40] S. Marcelja. Mathematical description of the response of simple cortical cells. *Journal of the Optical Society of America*, 70(11):1297–1300, 1980.
- [41] DL. Ringach. Mapping receptive fields in primary visual cortex. *J. Physiol.*, 558:717–728, 2004.
- [42] Barlow HB. Possible principles underlying the transformation of sensory messages. In WA Rosenblith, editor, *Sensory Communication*, pages 217–234. MIT Press, Cambridge, MA, 1961.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Anthony J. Bell and Terrence J. Sejnowski. The ‘independent components’ of natural scenes are edge filters. *Vision Research*, 37(23):3327–3338, 1997.

- [46] B.O. Olshausen E.P. Simoncelli. Natural image statistics and neural representation. *Annu. Rev. Neurosci.*, 24:1193–1216, 2001.
- [47] O. Schwartz and E. P. Simoncelli. Natural signal statistics and sensory gain control. *Nature Neuroscience*, 4(8):819–825, 2001.
- [48] F. Rieke, D. Warland, R. R. de Ruyter van Stevenink, and W. Bialek. *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press, 1996.
- [49] DL. Ringach. Spatial structure and symmetry of simple-cell receptive fields in macaque primary visual cortex. *J. Neurophysiol.*, 88:455–63, 2002.
- [50] 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.
- [51] J. Malo. La percepción del movimiento: parte de lo que pasa por tu cabeza en unos milisegundos. *Aletheia*, 5(1):11–17, 2007.
- [52] D. Marr. *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. W.H. Freeman and Co., 1980.
- [53] P. Dayan and L.F. Abbott. *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. MIT Press, 2001.
- [54] P. Capilla. *Percepción Visual: Psicofísica, Mecanismos y Modelos*. Editorial McGraw-Hill Interamericana, Madrid, 2018.
- [55] J. Malo, M.J. Luque, A. Diez-Ajenjo, and M.C. García-Domene. Matlab tools for the visual neuroscience class i: Simulating physiological experiments in motion sensitive neurons. *Proc. ICERI*, 1, 2014.
- [56] J. Malo, M.J. Luque, A. Diez-Ajenjo, and M.C. García-Domene. Matlab tools for the visual neuroscience class ii: Understanding the excitation patterns in v1 and mt areas. *Proc. ICERI*, 1, 2014.
- [57] Jae S. Lim. *Two-dimensional Signal and Image Processing*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1990.
- [58] D. Heeger. Model for the extraction of image flow. *J. Opt. Soc. Am. A*, 4:1455–1471, 1987.
- [59] A. B. Watson and J. Malo. Video quality measures based on the standard spatial observer. In *Proc. IEEE Int. Conf. Im. Proc.*, volume 3, pages III–III, Sept 2002.
- [60] Justin Laird, Mitchell Rosen, Jeff Pelz, Ethan Montag, and Scott Daly. Spatio-velocity csf as a function of retinal velocity using unstabilized stimuli. 6057:32–43, 02 2006.
- [61] C. Blakemore and F. W. Campbell. On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. *J. Physiol.*, 203:237–260, 1969.

- [62] D.G. Albrecht, W.S. Geisler, and A.M. Crane. *The Visual Neurosciences*, chapter Nonlinear properties of visual cortex neurons: Temporal dynamics, stimulus selectivity, neural performance, pages 747–764. MIT Press.
- [63] J.A. Solomon and D.G. Pelli. The visual filter mediating letter identification. *Nature*, 369:395–397, 1994.
- [64] 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.
- [65] J. Ross and H. Speed. Contrast adaptation and contrast masking in human vision. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 246:61–69, 1991.
- [66] J. Foley and C. Chen. Analysis of the effect of pattern adaptation on pattern pedestal effects: A two-process model. *Vision Res.*, 37:2779–2788, 1997.
- [67] Valero Laparra and Jesús Malo. Visual aftereffects and sensory nonlinearities from a single statistical framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9:557, 2015.
- [68] N. Van Surdam Graham. *Visual Pattern Analyzers*. Oxford Psychology Series. Oxford University Press, USA, 2001.
- [69] V. Laparra, J. Muñoz-Marí, and J. Malo. Divisive normalization image quality metric revisited. *JOSA A*, 27(4):852–864, 2010.
- [70] D. Cai, GC. DeAngelis, and Freeman RD. Spatiotemporal receptive field organization in the lateral geniculate nucleus of cats and kittens. *J. Neurophysiol.*, 78(2):1045–61, 1997.
- [71] Matteo Carandini and David J. Heeger. Normalization as a canonical neural computation. *Nature Reviews Neuroscience*, 13:51–62, 2011.
- [72] O. Schwartz and EP. Simoncelli. Natural signal statistics and sensory gain control. *Nat. Neurosci.*, 4(8):819–825, 2001.
- [73] E P Simoncelli and D J Heeger. A model of neuronal responses in visual area MT. *Vision Research*, 38(5):743–761, Mar 1998.
- [74] M. Martinez-Garcia, C. Praveen, T. Batard, M. Bertalmio, and J. Malo. Derivatives and inverse of cascaded linear+nonlinear neural models. *Accepted in PLoS ONE*, June 2018.
- [75] J.S. Werner and L.M. Chalupa. *The New Visual Neurosciences*. MIT Press, Cambridge, MA, 2014.
- [76] J.M. Artigas et al. *Óptica Fisiológica, Psicofísica de la Visión*. McGraw Hill, New York, 1995.
- [77] S.H. Schwartz. *Visual Perception: A Clinical Orientation*. MacGraw Hill, New York, 1999.

- [78] L. Spillmann and J.S. Werner. *Visual Perception: The Neurophysiological Foundations*. Academic Press, San Diego, CA, 1990.
- [79] R.M. Boynton. *Human Color Vision*. OSA Press, La Jolla, CA, 1992.
- [80] W.K. Pratt. *Digital Image Processing*. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [81] R.C. Gonzalez and P. Wintz. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishers, Reading, Massachusetts, 1987.
- [82] R.L. DeValois and K.K. DeValois. *Spatial Vision*. Oxford University Press, Oxford, 1990.
- [83] H.R. Kang. *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1997.
- [84] M.S. Landy and J.A. Movshon. *Computational Models of Visual Processing*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [85] G. Strang. *Introduction to Linear Algebra*. Wellesey-Cambridge Press, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- [86] R.O. Duda and P.E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1973.
- [87] L. Anshel and D. Goldfeld. *Calculus: a Computer Algebra Approach*. International Press, New York, 1997.
- [88] R.O. Duda, P.E. Hart, and D.G. Stork. *Pattern Classification*. Wiley, 2012.
- [89] K. Fukunaga. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. Academic Press, 1990.
- [90] J.G. Daugman. Entropy reduction and decorrelation in visual coding by oriented neural receptive fields. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 36:107–114, 1989.
- [91] Xuemei Zhang and Brian Wandell. A spatial extension of cielab for digital color image reproduction. 5, 11 1998.
- [92] P. Capilla, M. Diez-Ajenjo, M.J. Luque, and J. Malo. Corresponding-pair procedure: a new approach to simulation of dichromatic color perception. *JOSA A*, 21(2):176–186, 2004.
- [93] P. Capilla, M.J. Luque, and M. Diez. Simulating images seen by patients with inhomogeneous sensitivity losses. *Optom. Vis. Sci.*, 89(10):1543–1556, 2012.
- [94] John Losee. *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*. Alianza Universidad, Madrid, 1976.
- [95] Isaak Newton. *Optica*. (Traducción castellana de Carlos Solís) Alfaguara, Madrid, 1977.
- [96] D. Gabor. Theory of communication. *J. Inst. Elect. Eng.*, 93:429–457, 1946.

- [97] C.E. Shannon. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 27:373–423, 1948.
- [98] N. Wiener. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, chapter 6: *Computing machines and neural system*. MIT Press, Massachusetts, 1948.
- [99] John Von Neumann. *The computer and the brain*. Yale University Press, New Haven, 1958.
- [100] Richard P. Feynman. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison Wesley, New York, 1989.
- [101] E P Simoncelli and B A Olshausen. Natural image statistics and neural representation. *Annual Review of Neuroscience*, 24:1193–1216, 2001.
- [102] Karl Popper. *Conjectures and Refutations*. Basic Books, New York, 1963.
- [103] Thomas S. Khun. *The structure of scientific revolutions*. Chicago University Press, 1970.
- [104] Paul K. Feyerabend. *Against the method: outline of an anarchist theory of knowledge*. Minnesota University Press, 1970.
- [105] American Television Academy. 67th emmy engineering award for alan bovik et al. <http://www.emmys.com/news/awards-news/television-academy-names-honorees-67th-emmy-engineering-awards>, 2015.
- [106] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G.E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In F. Pereira, C.J.C. Burges, L. Bottou, and K.Q. Weinberger, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, pages 1097–1105. Curran Associates, Inc., 2012.
- [107] A. Mahendran and A. Vedaldi. Understanding deep image representations by inverting them. In *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 5188–5196, June 2015.
- [108] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton. Deep learning. *Nature*, 521(7553):436–444, May 2015.
- [109] M. Bertalmio, P. Cyriac, T. Batard, M. Martinez-Garcia, and J. Malo. The wilson-cowan model describes contrast response and subjective distortion. *J. Vis.*, 17(10):657, 2017.
- [110] J. Malo and M. Bertalmio. Appropriate kernels for divisive normalization explained by wilson-cowan equations. *ArXiv, Quant.Biol.:1804.05964*, 2018.
- [111] M. Bertalmio and J. D. Cowan. Implementing the retinex algorithm with wilson-cowan equations. *J. Physiol. Paris*, 103(1-2):69–72, 2009.
- [112] J. D. Cowan, J. Neuman, and W. van Drongelen. Wilson-cowan equations for neocortical dynamics. *J Math Neurosci*, 6(1):1, Dec 2016.

- [113] R. Ben-Yishai, R. L. Bar-Or, and H. Sompolinsky. Theory of orientation tuning in visual cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 92(9):3844–3848, Apr 1995.
- [114] Z. Li. Visual segmentation by contextual influences via intra-cortical interactions in the primary visual cortex. *Network*, 10(2):187–212, May 1999.
- [115] I. Lampl, J.S. Anderson, D.C. Gillespie, and D. Ferster. Prediction of orientation selectivity from receptive field architecture in simple cells of cat visual cortex. *Neuron*, 30(1):263–274, Apr 2001.
- [116] O. Penacchio, X. Otazu, and L. Dempere-Marco. A neurodynamical model of brightness induction in v1. *PLoS ONE*, 8(5):e64086, 2013.
- [117] H.R. Wilson and J.D. Cowan. Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons. *Biophys. J.*, 12(1):1–24, Jan 1972.
- [118] D.J. Heeger. Normalization of cell responses in cat striate cortex. *Vis. Neurosci.*, 9(2):181–197, Aug 1992.
- [119] M. Carandini and D. J. Heeger. Summation and division by neurons in primate visual cortex. *Science*, 264(5163):1333–1336, May 1994.
- [120] N. Murray, M. Vanrell, X. Otazu, and C.A. Parraga. Low-level spatiochromatic grouping for saliency estimation. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 35(11):2810–2816, Nov 2013.
- [121] D. Berga and X. Otazu. A multi-task neurodynamical model of lateral interactions in v1: Visual saliency of colour images. In *39th European Conference on Visual Perception (ECVP) 2016*, volume 45, page 51, January 2016.
- [122] D. Berga and X. Otazu. Neurodynamical evidence of gaze prediction decrease with saccade number. *40th European Conference on Visual Perception ECVP 2017*, 2017.
- [123] J. Malo, I. Epifanio, R. Navarro, and E.P. Simoncelli. Nonlinear image representation for efficient perceptual coding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(1):68–80, Jan 2006.
- [124] J. Malo and V. Laparra. Psychophysically tuned divisive normalization approximately factorizes the pdf of natural images. *Neural Comput*, 22(12):3179–3206, Dec 2010.
- [125] J. Malo and E.P. Simoncelli. Geometrical and statistical properties of vision models obtained via maximum differentiation. In B.E. Rogowitz, T.N. Pappas, and Ridder H., editors, *Proc. SPIE, Human Vision and Electronic Imaging XX*, volume 9394, page 93940L, 2015.
- [126] X. Otazu, M. Vanrell, and C. Alejandro Parraga. Multiresolution wavelet framework models brightness induction effects. *Vision Res.*, 48(5):733–751, Feb 2008.
- [127] X. Otazu, C.A. Parraga, and M. Vanrell. Toward a unified chromatic induction model. *J Vis*, 10(12):5, Oct 2010.

- [128] S. Jiménez, X. Otazu, V. Laparra, and J. Malo. Chromatic induction and contrast masking: similar models, different goals? volume 8651, pages 8651–8656, 2013.
- [129] A. Akbarinia and C.A. Parraga. Dynamically adjusted surround contrast enhances boundary. In *39th European Conference on Visual Perception (ECVP) 2016*, volume 45, pages 254–254, January 2016.
- [130] A. Akbarinia and C.A. Parraga. Colour constancy beyond the classical receptive field. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, Sep 2017.
- [131] V. Laparra, S. Jimenez, G. Camps-Valls, and J. Malo. Nonlinearities and adaptation of color vision from sequential principal curves analysis. *Neural Comput*, 24(10):2751–2788, Oct 2012.
- [132] M.U. Gutmann, V. Laparra, A. Hyvarinen, and J. Malo. Spatio-chromatic adaptation via higher-order canonical correlation analysis of natural images. *PLoS ONE*, 9(2):e86481, 2014.
- [133] P. Capilla, M.A. Diez-Ajenjo, M.J. Luque, and J. Malo. Corresponding-pair procedure: a new approach to simulation of dichromatic color perception. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 21(2):176–186, Feb 2004.
- [134] A. Wilkins, O. Penacchio, and U. Leonards. Problems with patterns in the built environment. *Persp. on Psych. Sci. (submitted)*, 2016.
- [135] A.T.D. Le, J. Payne, C. Clarke, M.A. Kelly, F. Prudenziati, E. Armsby, O. Penacchio, and A.J. Wilkins. Discomfort from urban scenes: Metabolic consequences. *Landscape and Urban Planning*, 160:61–68, 2017.
- [136] et al. O. Penacchio. Sparse-coding, lateral interactions and visual overload. *Curr. Biol. (submitted)*, 2017.
- [137] C. Redies. Combining universal beauty and cultural context in a unifying model of visual aesthetic experience. *Front Hum Neurosci*, 9:218, 2015.
- [138] Z. Wang and A. C. Bovik. Mean squared error: Love it or leave it? a new look at signal fidelity measures. *IEEE Signal Processing Magazine*, 26(1):98–117, Jan 2009.
- [139] P. Bodrogi, A. Bovik, C. Charrier, C. Fernandez-Maloigne, J. Hardeberg, M.C. Larabi, J. Malo, X. Otazu, M. Pedersen, N. Richard, A. Rizzi, M. Saad, and H. Saadane. A survey about image and video quality evaluation metrics. Technical Report of the CIE, Division 8: Image Technology, 2017.
- [140] O. Penacchio and A.J. Wilkins. Visual discomfort and the spatial distribution of fourier energy. *Vision Res.*, 108:1–7, Mar 2015.
- [141] S. Nishimoto, A.T. Vu, T. Naselaris, Y. Benjamini, B. Yu, and J.L. Gallant. Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies. *Curr. Biol.*, 21(19):1641–1646, Oct 2011.

- [142] J.L. Gallant. Reverse engineering the human visual system. Plenary Talk at CVPR2015, Comp. Vis. Patt. Recogn., 2015. <http://techtalks.tv/talks/reverse-engineering-the-human-visual-system/61640> (accessed 04-07-2018).
- [143] J. Freeman and E.P. Simoncelli. Metamers of the ventral stream. *Nat. Neurosci.*, 14(9):1195–1201, Aug 2011.
- [144] L.A. Gatys, A.S. Ecker, and M. Bethge. Image style transfer using convolutional neural networks. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 2414–2423, June 2016.
- [145] L.A. Gatys, A.S. Ecker, M. Bethge, A. Hertzmann, and E. Shechtman. Controlling perceptual factors in neural style transfer. In *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 3730–3738, July 2017.
- [146] Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, and E.P. Simoncelli. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4):600–612, April 2004.
- [147] J. Malo, AM Pons, and J.M. Artigas. Subjective image fidelity metric based on bit allocation of the human visual system in the dct domain. *Image and Vision Computing*, 15(7):535–548, 1997.
- [148] A.M. Pons, J. Malo, J.M. Artigas, and P. Capilla. Image quality metric based on multidimensional contrast perception models. *Displays*, 20:93–110, 1999.
- [149] Z. Wang and E.P. Simoncelli. Maximum differentiation (mad) competition: a methodology for comparing computational models of perceptual quantities. *J Vis*, 8(12):1–13, Sep 2008.
- [150] M. Bertalmio, D. Kane, and J. Malo. The maximum differentiation competition depends on the viewing conditions. *J. Vis.*, 16(12):822, 2016.
- [151] V.S. Ramachandran and W. Hirstein. The science of art: A neurological theory of aesthetic experience. *J. Conscious. Stud.*, 6(6-7):15–51, 1999.
- [152] S. Zeki. *Inner Vision: An Exploration of Art and the Brain*. Oxford University Press, 1999.
- [153] M.S. Livingstone. *Vision and Art : The Biology of Seeing*. Harry N. Abrams, Inc., 2002.
- [154] T. Ishizu and S. Zeki. Toward a brain-based theory of beauty. *PLoS ONE*, 6(7):e21852, 2011.
- [155] T. Ishizu and S. Zeki. The brain’s specialized systems for aesthetic and perceptual judgment. *Eur. J. Neurosci.*, 37(9):1413–1420, May 2013.
- [156] H.B. Barlow. Possible principles underlying the transformation of sensory messages. 1961.

- [157] The human visual system is optimised for processing the spatial information in natural visual images. *Curr. Biol.*, 10(1):35–38, Jan 2000.
- [158] E.P. Simoncelli and B.A. Olshausen. Natural image statistics and neural representation. *Annu. Rev. Neurosci.*, 24:1193–1216, 2001.
- [159] C.A. Parraga, T. Troscianko, and D.J. Tolhurst. Spatiochromatic properties of natural images and human vision. *Curr. Biol.*, 12(6):483–487, Mar 2002.
- [160] D. Dutton. *The Art Instinct: Beauty, Pleasure, and Human Evolution*. Oxford University Press, 2010.
- [161] K. C. Berridge and M. L. Kringelbach. Neuroscience of affect: brain mechanisms of pleasure and displeasure. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 23(3):294–303, Jun 2013.
- [162] A. J. Blood, R. J. Zatorre, P. Bermudez, and A. C. Evans. Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nat. Neurosci.*, 2(4):382–387, Apr 1999.
- [163] A. Chatterjee. Neuroaesthetics: A coming of age story. *J.Cogn.Neurosci*, 23(1):53–62, 2011.
- [164] U. Kirk, M. Skov, O. Hulme, M.S. Christensen, and S. Zeki. Modulation of aesthetic value by semantic context: an fmri study. *Neuroimage*, 44(3):1125–1132, Feb 2009.
- [165] B. R. Conway and M. S. Livingstone. Perspectives on science and art. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 17(4):476–482, Aug 2007.
- [166] J.H. McDermott. *Neuroscience of Preference and Choice : Cognitive and Neural Mechanisms*, chapter Auditory Preferences and Aesthetics: Music, Voices, and Everyday Sounds, pages 227–256. Academic Press, 2012.
- [167] B. Spehar and R.P. Taylor. Fractals in art and nature: why do we like them? volume 8651, pages 8651–1–8651–12, 2013.
- [168] B. Spehar, S. Wong, S. van de Klundert, J. Lui, C.W. Clifford, and R.P. Taylor. Beauty and the beholder: the role of visual sensitivity in visual preference. *Front Hum Neurosci*, 9:514, 2015.
- [169] Z. Wang and A.C. Bovik. Reduced- and no-reference image quality assessment. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(6):29–40, Nov 2011.
- [170] A. K. Moorthy and A. C. Bovik. Blind image quality assessment: from natural scene statistics to perceptual quality. *IEEE Trans Image Process*, 20(12):3350–3364, Dec 2011.
- [171] M. A. Saad, A. C. Bovik, and C. Charrier. Blind image quality assessment: a natural scene statistics approach in the dct domain. *IEEE Trans Image Process*, 21(8):3339–3352, Aug 2012.

- [172] A. Wilkins, I. Nimmo-Smith, A. Tait, C. McManus, S. Della Sala, A. Tilley, K. Arnold, M. Barrie, and S. Scott. A neurological basis for visual discomfort. *Brain*, 107 (Pt 4):989–1017, Dec 1984.
- [173] A.J. Wilkins. *Visual Stress*. Oxford University Press, 1995.
- [174] E. G. Conlon, W. J. Lovegrove, E. Chekaluk, and P. E. Pattison. Measuring visual discomfort. *Visual Cognition*, 6(6):637–663, 1999.
- [175] D. Fernandez and A.J. Wilkins. Uncomfortable images in art and nature. *Perception*, 37(7):1098–1113, 2008.
- [176] I. Juricevic, L. Land, A. Wilkins, and M.A. Webster. Visual discomfort and natural image statistics. *Perception*, 39(7):884–899, 2010.
- [177] S. M. Haigh, L. Barningham, M. Berntsen, L. V. Coutts, E. S. Hobbs, J. Irbor, E. M. Lever, P. Tang, and A. J. Wilkins. Discomfort and the cortical haemodynamic response to coloured gratings. *Vision Res.*, 89:47–53, Aug 2013.
- [178] A.J. Wilkins, C.E. Darby, and C.D. Binnie. Neurophysiological aspects of pattern-sensitive epilepsy. *Brain*, 102(1):1–25, Mar 1979.
- [179] K. Radhakrishnan, E.K. St Louis, J.A. Johnson, R L. McClelland, B F. Westmoreland, and D.W. Klass. Pattern-sensitive epilepsy: electroclinical characteristics, natural history, and delineation of the epileptic syndrome. *Epilepsia*, 46(1):48–58, Jan 2005.
- [180] P. Gormley and co authors. Meta-analysis of 375,000 individuals identifies 38 susceptibility loci for migraine. *Nat. Genet.*, 48(8):856–866, 08 2016.
- [181] M. Torres-Ferrus, M. Quintana, J. Fernandez-Morales, J. Alvarez-Sabin, and P. Pozo-Rosich. When does chronic migraine strike? a clinical comparison of migraine according to the headache days suffered per month. *Cephalalgia*, 37(2):104–113, Feb 2017.
- [182] D.J. Field. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells. *J Opt Soc Am A*, 4(12):2379–2394, Dec 1987.
- [183] J.J. Atick. Could information theory provide an ecological theory of sensory processing? *Neural Computation*, 3:213–251, 1992.
- [184] D. H. Baker and E. W. Graf. Natural images dominate in binocular rivalry. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106(13):5436–5441, Mar 2009.
- [185] O. Penacchio, A.J. Wilkins, X. Otazu, and J.M. Harris. Inhibitory function and its contribution to cortical hyperexcitability and visual discomfort as assessed by a computation model of cortical function. In *39th European Conference on Visual Perception (ECVP) 2016*, volume 45, pages 272–272, January 2016.
- [186] P.S. Churchland and T.J. Sejnowski. *The Computational Brain*. MIT Press, 1992.

- [187] F. Rieke. *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press, 1997.
- [188] B.A. Olshausen and D.J. Field. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images. *Nature*, 381(6583):607–609, Jun 1996.
- [189] O. Schwartz and E.P. Simoncelli. Natural signal statistics and sensory gain control. *Nat. Neurosci.*, 4(8):819–825, Aug 2001.
- [190] J. Malo and J. Gutierrez. V1 non-linear properties emerge from local-to-global non-linear ica. *Net: Comp Neur Sys*, 17(1):85–102, Mar 2006.
- [191] V. Laparra, Michael U Gutmann, J. Malo, and A. Hyvärinen. Complex-valued independent component analysis of natural images. In *Artificial Neural Networks and Machine Learning–ICANN 2011*, pages 213–220. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [192] P. Sterling and S. Laughlin. *Principles of Neural Design*. MIT Press, 2017.
- [193] A.M. Tekalp. *Digital Video Processing*. Prentice Hall PTR, 1995.
- [194] D.S. Taubman and M.W. Marcellin. *Jpeg2000: Image Compression Fundamentals, Standards, and Practice*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [195] J. Malo, J. Gutierrez, I. Epifanio, F.J. Ferri, and J.M. Artigas. Perceptual feedback in multigrid motion estimation using an improved dct quantization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(10):1411–1427, Oct 2001.
- [196] G. Camps-Valls, J. Gutierrez, G. Gomez-Perez, and J. Malo. On the suitable domain for svm training in image coding. *Journal of Machine Learning Research*, 9:49–66, 2008.
- [197] J. Malo, J. Gutierrez, G. Camps-Valls, and Luque M.J. Method, apparatus and software for color image compression based on non-linear perceptual representations and machine learning. Patent Num. P200801943, Ofic. Esp. Patentes y Marcas, 2008.
- [198] J. Moreno and X. Otazu. Image compression algorithm based on hilbert scanning of embedded quadrees: An introduction of the hi-set coder. In *2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pages 1–6, July 2011.
- [199] J.J. Moreno. Perceptual criteria on image compression. PhD Thesis submitted to the Computer Science Department, Universitat Autònoma de Barcelona, 2011.
- [200] N. Kriegeskorte and G. Kreiman. *Visual Population Codes : Toward a Common Multivariate Framework for Cell Recording and Functional Imaging*. MIT Press, 2012.
- [201] G.B. Stanley, F.F. Li, and Y. Dan. Reconstruction of natural scenes from ensemble responses in the lateral geniculate nucleus. *J. Neurosci.*, 19(18):8036–8042, Sep 1999.

- [202] Y. Miyawaki, H. Uchida, O. Yamashita, M.A. Sato, Y. Morito, H.C. Tanabe, N. Sadato, and Y. Kamitani. Visual image reconstruction from human brain activity using a combination of multiscale local image decoders. *Neuron*, 60(5):915–929, Dec 2008.
- [203] G. Gomez-Perez, G. Camps-Valls, J. Gutierrez, and J. Malo. Perceptual adaptive insensitivity for support vector machine image coding. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 16(6):1574–1581, Nov 2005.
- [204] N. Amrani, J. Serra-Sagrista, V. Laparra, M.W. Marcellin, and J. Malo. Regression wavelet analysis for lossless coding of remote-sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(9):5616–5627, Sept 2016.
- [205] S. Jiménez and J. Malo. The role of spatial information in disentangling the irradiance-reflectance-transmittance ambiguity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(8):4881–4894, Aug 2014.
- [206] V. Laparra, J. Gutierrez, G. Camps-Valls, and J. Malo. Image denoising with kernels based on natural image relations. *Journal of Machine Learning Research*, 11:873–903, 2010.
- [207] V. Laparra, G. Camps-Valls, and J. Malo. Rotation-based iterative gaussianization: from ICA to random rotations. *IEEE Trans. Neur. Nets.*, 22(4):537–549, 2011.
- [208] A. B. Abrams, J. M. Hillis, and D. H. Brainard. The relation between color discrimination and color constancy: when is optimal adaptation task dependent? *Neural Comput*, 19(10):2610–2637, Oct 2007.
- [209] R. Coen-Cagli and O. Schwartz. The impact on midlevel vision of statistically optimal divisive normalization in v1. *J Vis*, 13(8), Jul 2013.
- [210] M. Morgan, C. Chubb, and J.A. Solomon. Predicting the motion after-effect from sensitivity loss. *Vision Res.*, 46(15):2412–2420, Jul 2006.
- [211] J. Roca-Vila, C.A. Parraga, and M. Vanrell. Chromatic settings and the structural color constancy index. *J Vis*, 13(4), Mar 2013.
- [212] A. Akbarinia and C.A. Parraga. Colour constancy as a product of dynamic centre-surround adaptation. In *Vision Sciences Society 2016 Meeting (VSS2016)*, volume 16, pages 254–254, January 2016.
- [213] P. Capilla, M.J. Luque, M.D. de Fez, M.C. Garcia-Domene, and M.A. Diez-Ajenjo. Simulating images seen by patients with inhomogeneous sensitivity losses. *Optom Vis Sci*, 89(10):1543–1556, Oct 2012.
- [214] M.J. Luque, D. Fez, and P. Acevedo. Software for simulating dichromatic perception of video streams. *Color Research & Application*, 39(5):486–491.
- [215] R. Miikkulainen. *Computational Maps in the Visual Cortex*. Springer, 2005.
- [216] J. A. Bednar. Building a mechanistic model of the development and function of the primary visual cortex. *J. Physiol. Paris*, 106(5-6):194–211, 2012.

- [217] M. Kaschube, M. Schnabel, S. Lowel, D.M. Coppola, L.E. White, and F. Wolf. Universality in the evolution of orientation columns in the visual cortex. *Science*, 330(6007):1113–1116, Nov 2010.
- [218] M. Kaschube. Neural maps versus salt-and-pepper organization in visual cortex. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 24(1):95–102, Feb 2014.
- [219] S. Grossberg. How does the cerebral cortex work? Learning, attention, and grouping by the laminar circuits of visual cortex. *Spat Vis*, 12(2):163–185, 1999.
- [220] S. Grossberg. Towards a unified theory of neocortex: laminar cortical circuits for vision and cognition. *Prog. Brain Res.*, 165:79–104, 2007.
- [221] S.P. Wilson and J.A. Bednar. What, if anything, are topological maps for? *Dev Neurobiol*, 75(6):667–681, Jun 2015.
- [222] A. Hyvarinen and P.O. Hoyer. A two-layer sparse coding model learns simple and complex cell receptive fields and topography from natural images. *Vision Res.*, 41(18):2413–2423, Aug 2001.
- [223] M. Martinez-Garcia, L.M. Martinez, and J. Malo. Topographic independent component analysis reveals random scrambling of orientation in visual space. *PLoS ONE*, 12(6):e0178345, 2017.
- [224] M.H. Herzog, U.A. Ernst, A. Etzold, and C.W. Eurich. Local interactions in neural networks explain global effects in gestalt processing and masking. *Neural Comput*, 15(9):2091–2113, Sep 2003.
- [225] R. Datta, D. Joshi, J. Li, and J.Z. Wang. Studying aesthetics in photographic images using a computational approach. In A. Leonardis, H. Bischof, and A. Pinz, editors, *Computer Vision – ECCV 2006*, pages 288–301, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer Berlin Heidelberg.
- [226] Y. Ke, X. Tang, and F. Jing. The design of high-level features for photo quality assessment. In *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’06)*, volume 1, pages 419–426, June 2006.
- [227] R. Datta, J. Li, and J.Z. Wang. Algorithmic inferencing of aesthetics and emotion in natural images: An exposition. In *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*, pages 105–108, Oct 2008.
- [228] Y. Luo and X. Tang. Photo and video quality evaluation: Focusing on the subject. In D. Forsyth, P. Torr, and A. Zisserman, editors, *Computer Vision - ECCV 2008*, pages 386–399, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [229] S. Dhar, V. Ordonez, and T. L. Berg. High level describable attributes for predicting aesthetics and interestingness. In *CVPR 2011*, pages 1657–1664, June 2011.

- [230] L. Marchesotti, F. Perronnin, D. Larlus, and G. Csurka. Assessing the aesthetic quality of photographs using generic image descriptors. In *2011 International Conference on Computer Vision*, pages 1784–1791, Nov 2011.
- [231] N. Murray, L. Marchesotti, and F. Perronnin. Ava: A large-scale database for aesthetic visual analysis. In *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 2408–2415, June 2012.
- [232] N. Murray, M. Vanrell, X. Otazu, and C.A. Parraga. Saliency estimation using a non-parametric low-level vision model. In *CVPR 2011*, pages 433–440, June 2011.
- [233] LLC. Challenging Technologies. Dpchallenge - a digital photography contest. <http://www.dpchallenge.com/>, 2016. [Online; accessed 04-07-2018].
- [234] D. Wagner, V. Manahilov, G. Loffler, G.E. Gordon, and G.N. Dutton. Visual noise selectively degrades vision in migraine. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 51(4):2294–2299, Apr 2010.
- [235] L. O’Hare and P.B. Hibbard. Spatial frequency and visual discomfort. *Vision Res.*, 51(15):1767–1777, Aug 2011.
- [236] D. Wagner, V. Manahilov, G.E. Gordon, and G. Loffler. Global shape processing deficits are amplified by temporal masking in migraine. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 54(2):1160–1168, Feb 2013.
- [237] F. Attneave. Some informational aspects of visual perception. *Psychol Rev*, 61(3):183–193, May 1954.
- [238] G. Coppola, A. Ambrosini, L. Di Clemente, D. Magis, A. Fumal, P. Gerard, F. Pierelli, and J. Schoenen. Interictal abnormalities of gamma band activity in visual evoked responses in migraine: an indication of thalamocortical dysrhythmia? *Cephalalgia*, 27(12):1360–1367, Dec 2007.
- [239] M. de Tommaso, A. Ambrosini, F. Brighina, G. Coppola, A. Perrotta, F. Pierelli, G. Sandrini, M. Valeriani, D. Marinazzo, S. Stramaglia, and J. Schoenen. Altered processing of sensory stimuli in patients with migraine. *Nat Rev Neurol*, 10(3):144–155, Mar 2014.
- [240] D. Hermes, D.G.A. Kasteleijn-Nolst Trenite, and J. Winawer. Gamma oscillations and photosensitive epilepsy. *Curr. Biol.*, 27(9):R336–R338, May 2017.
- [241] L. O’Hare and P.B. Hibbard. Visual processing in migraine. *Cephalalgia*, 36(11):1057–1076, Oct 2016.
- [242] F. Devalle, A. Roxin, and E. Montbrió. Firing rate equations require a spike synchrony mechanism to correctly describe fast oscillations in inhibitory networks. *PLoS Comput. Biol.*, 13(12):e1005881, 12 2017.
- [243] X. Cerda-Company and X. Otazu. Equiluminant colour induction in flashed and static stimuli. Scottish Vision Group Conference, 2017.

- [244] A. Lazar, K. Kay, N. Kriegeskorte, S. Nishimoto, J. Jarhee, O. Marre, and J. Malo. What is in your mind?: Inversion problems in vision science. Workshop in the Eur. Conf. Visual Percept., 2016.
- [245] K.N. Kay, J. Winawer, A. Rokem, A. Mezer, and B.A. Wandell. A two-stage cascade model of bold responses in human visual cortex. *PLoS Comput. Biol.*, 9(5):e1003079, 2013.
- [246] X. Cerda-Company and X. Otazu. A multi-task neurodynamical model of lateral interactions in v1: Chromatic induction. In *39th European Conference on Visual Perception (ECVP) 2016*, volume 45, pages 52–53, January 2016.
- [247] S. Shushruth, J. M. Ichida, J. B. Levitt, and A. Angelucci. Comparison of spatial summation properties of neurons in macaque v1 and v2. *J. Neurophysiol.*, 102(4):2069–2083, Oct 2009.
- [248] L. Schwabe, J. M. Ichida, S. Shushruth, P. Mangapathy, and A. Angelucci. Contrast-dependence of surround suppression in macaque v1: experimental testing of a recurrent network model. *Neuroimage*, 52(3):777–792, Sep 2010.
- [249] A. Akbarinia and C.A. Parraga. Biologically-inspired edge detection through surround modulation. British Machine Vision Conference (BMVC) 2016, 2016.
- [250] A. Akbarinia and C.A. Parraga. Feedback and surround modulated boundary detection. *International Journal of Computer Vision*, pages 1–14, Jul 2017.
- [251] X. Otazu. Salvador de madariaga project for research stay at university of st andrews. Ministerio de Educacion, Cultura y Deporte (Spain), 2017.
- [252] E.N. Johnson, M.J. Hawken, and R. Shapley. The orientation selectivity of color-responsive neurons in macaque v1. *J. Neurosci.*, 28(32):8096–8106, Aug 2008.
- [253] M. Martinez-Garcia, M. Bertalmio, and J. Malo. In praise of artifice reloaded: Caution with subjective image quality databases. *ArXiv, Quant.Biol.:1801.09632*, 2018.
- [254] M. Expósito-Ventura, C.A. Parraga, and B. Raducanu. Aesthetics without semantics: A new dataset of natural scenes devoid of semantic content. In *European Conference on Visual Perception 2016 Meeting, Visual Science of Art Conference*, 2016.
- [255] M. Exposito-Ventura. Including ugly features to improve aesthetic judgement prediction in natural images. MSc. Thesis submitted to the Computer Science, Univesitat Autonoma de Barcelona, 2015.
- [256] L.L. Thurstone. A law of comparative judgment. *Psychol. Rev.*, 34:273–286, 1927.
- [257] C.A. Parraga and A. Akbarinia. Nice: A computational solution to close the gap from colour perception to colour categorization. *PLoS ONE*, 11(3):e0149538, 2016.

- [258] Z. Li. A saliency map in primary visual cortex. *Trends Cogn. Sci. (Regul. Ed.)*, 6(1):9–16, Jan 2002.
- [259] J. Huang, T.G. Cooper, B. Satana, D.I. Kaufman, and Y. Cao. Visual distortion provoked by a stimulus in migraine associated with hyperneuronal activity. *Headache*, 43(6):664–671, Jun 2003.
- [260] J. Alvarez-Linera Prado, M. Rios-Lago, H. Martin-Alvarez, J.A. Hernandez-Tamames, J. Escribano-Vera, and M. Sanchez del Rio. Functional magnetic resonance imaging of the visual cortex: relation between stimulus intensity and bold response. *Rev Neurol*, 45(3):147–151, 2007.
- [261] H. Martin, M. Sanchez del Rio, C.L. de Silanes, J. Alvarez-Linera, J.A. Hernandez, and J.A. Pareja. Photoreactivity of the occipital cortex measured by functional magnetic resonance imaging-blood oxygenation level dependent in migraine patients and healthy volunteers: pathophysiological implications. *Headache*, 51(10):1520–1528, 2011.
- [262] B. D. Chouinard, C. I. Zhou, S. Hrybowski, E. S. Kim, and J. Cummine. A functional neuroimaging case study of meares-irlen syndrome/visual stress (misvis). *Brain Topogr*, 25(3):293–307, Jul 2012.
- [263] B. Cucchiara, R. Datta, G. K. Aguirre, K. E. Idoko, and J. Detre. Measurement of visual sensitivity in migraine: Validation of two scales and correlation with visual cortex activation. *Cephalalgia*, 35(7):585–592, Jun 2015.
- [264] F. Liang, C. Liu, and R.J. Carroll. *Advanced Markov Chain Monte Carlo Methods: Learning from Past Samples*. John Wiley and Sons, Ltd, 2010.
- [265] L. Martino and V. Elvira. *Metropolis Sampling; In Wiley Statsref-Online*. Wiley, 2017.