

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

Departamento de Psicología Básica I



PROCESOS VISUALES DE DEMODULACIÓN ESPACIAL

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Ignacio Serrano Pedraza

Bajo la dirección del doctor

Vicente Sierra Vázquez

Madrid, 2005

ISBN: 84-669-2836-7

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE PSICOLOGÍA**

DEPARTAMENTO DE PSICOLOGÍA BÁSICA I



**PROCESOS VISUALES DE DEMODULACIÓN
ESPACIAL**

TESIS DOCTORAL

Autor: Ignacio Serrano Pedraza

Director: Vicente Sierra Vázquez

Madrid, 2005

A Paula

AGRADECIMIENTOS

Muchas son las personas que han contribuido de alguna manera a la realización de esta Tesis. Por ello, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas ellas.

En primer lugar quisiera agradecer al Dr. Vicente Sierra Vázquez la dirección de esta Tesis. A él debo mi interés en el estudio del sistema visual humano,

También quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Luis Enrique López Bascuas y al Dr. Miguel Ángel García Pérez por la revisión realizada a la primera versión de este trabajo. Parte de sus comentarios críticos se han tenido en cuenta aunque la responsabilidad de este trabajo es solo mía.

Quisiera dar las gracias a Gonzalo García Baz por su participación en todos los experimentos.

Especialmente, quisiera agradecer a mi mujer Paula y a mi hijo Ignacio su apoyo en los momentos difíciles, y por ser mi fuente de inspiración.

Por último quisiera dar las gracias a mi familia por su apoyo, a mis padres Mariano y Teresa y a mis hermanos Mariano y Alberto.

Esta Tesis forma parte del proyecto de investigación #BSO2002-00192 concedido a V. Sierra Vázquez e I. Serrano Pedraza.

RESUMEN

Esta Tesis trata de la caracterización psicofísica 1D del mecanismo visual implicado en la detección de características de la imagen no accesibles mediante el procesamiento por los tradicionales canales o filtros del *mecanismo de primer orden* (filtros de primer orden) propuestos por la teoría multicanal de la visión espacial humana. Las imágenes con estas características se han denominado estímulos de segundo orden y el mecanismo visual implicado en su procesamiento, *mecanismo de segundo orden*. Los estímulos de segundo orden utilizados en esta Tesis son imágenes de contraste modulado espacialmente (estímulos CM) y el esquema propuesto para demodular el contraste de estos estímulos es el denominado filtro-rectificación-filtro (o esquema FRF). Según este esquema, el estímulo visual es procesado en una primera etapa por un banco de filtros lineales (filtros de la primera etapa) que son selectivamente sensibles a la frecuencia espacial, su salida es rectificadora, y finalmente, en una segunda etapa, otro banco de filtros lineales (filtros de la segunda etapa) opera sobre la salida rectificadora (envolvente). El propósito de la tarea teórica y experimental llevada a cabo en esa Tesis es completar algunos aspectos de ese esquema y diseñar un modelo computable que explique (al menos cualitativamente) resultados experimentales y fenómenos perceptivos conocidos.

En primer lugar, se ha probado el grado de linealidad del mecanismo visual de segundo orden considerado como un sistema total. Para ello, utilizando estímulos CM, se comparan las sensibilidades entre dos tipos de modulación del contraste de ruido binario 2D (función portadora), una, en forma de onda sinusoidal y otra, en forma de onda cuadrada para diferentes frecuencias de modulación. Los resultados muestran que la razón de sensibilidades es aproximadamente igual a $4/\pi$ para todas las frecuencias de modulación utilizadas, como debería ser si el mecanismo de segundo orden de comportara de modo lineal.

En segundo lugar, se han confirmado las características espectrales (espaciales) de los filtros de la primera etapa del mecanismo de segundo orden (identificados con los tradicionales canales de primer orden) utilizando el paradigma de enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas. Para ello se ha llevado a cabo un estudio intensivo de la

función de transferencia de modulación anisotrópica (FTM-1D) de los filtros mediante la medida del umbral de detección de un enrejado sinusoidal de 1 c/gav enmascarado con seis clases de ruido equienergético 1D (ruido paso-todo, paso-bajo, paso-alto, con muesca espectral, paso-banda, y paso-banda doble) y de otro de 3 c/gav enmascarado con ruido paso-banda. Los umbrales de detección fueron medidos usando escaleras adaptativas bayesianas en un paradigma de elección forzada de dos alternativas presentadas temporalmente. Para cada uno de los dos sujetos, se ajustó simultáneamente la ecuación del modelo de enmascaramiento a los umbrales obtenidos en los siete experimentos. Se supusieron dos formas para la FTM-1D de los canales, una función asimétrica y otra simétrica, ambas en escala lineal (función lognormal y función gaussiana) y dos modelos de detección: detección mediante canal fijo y detección mediante canal variable (que tiene en cuenta el efecto de off-frequency looking). Los principales resultados obtenidos fueron los siguientes: 1) Los umbrales de contraste al cuadrado incrementan linealmente con el incremento del nivel de ruido máscara, indicando que la forma de los filtros no es dependiente del nivel; 2) la FTM lognormal proporcionó el mejor ajuste para ambos sujetos; y 3) la anchura de banda en octavas de la FTM de los canales decrece con el aumento de la frecuencia de pico de éstos.

En tercer lugar, se han estudiado las características espectrales (espaciales) de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden, utilizando el paradigma de enmascaramiento citado pero generalizado al dominio de la modulación en amplitud. Para ello, se midieron los umbrales de detección para estímulos CM en los que la modulación sinusoidal del contraste fue enmascarada por ruido modulador paso-banda (hasta donde llega nuestro conocimiento es la primera vez que se realiza en visión este experimento). La función portadora fue ruido binario 2D, las señales fueron modulaciones sinusoidales de frecuencia espacial 1 y 3 c/gav, y el ruido máscara fue una modulación ruidosa paso-banda centrada en diferentes frecuencias de modulación. Los principales resultados obtenidos en el dominio de la modulación de la amplitud fueron: 1) La existencia de múltiples canales selectivos en frecuencia cuyas frecuencias de pico cubren todo el rango del dominio de la modulación; 2) en este caso, las FTMs lognormal y gaussiana proporcionaron ajustes similares para ambos sujetos; y 3) la anchura de banda en octavas de la FTM de los canales

decrece con el aumento de la frecuencia de pico de éstos. Estos resultados sugieren que la segunda etapa del esquema FRF se compone de un banco de filtros lineales solapados, selectivos a la frecuencia de la modulación, que descomponen la envolvente de la imagen en el rango de 0.1 a 15 c/gav (al nivel de luminancia utilizado) y cuya anchura de banda en octavas decrece con el aumento de su frecuencia de pico. Así pues, la estructura de los filtros de la segunda etapa parece replicar con ligeras variantes la arquitectura funcional conocida de los filtros de primer orden.

Finalmente, los resultados obtenidos se han incorporado a un modelo computable para el mecanismo de segundo orden con el fin de proponer explicaciones de resultados experimentales obtenidos por otros investigadores y fenómenos de la percepción visual de la forma no explicados hasta ahora (como el agrupamiento perceptivo y la percepción de ilusiones geométricas en imágenes cuyo espectro Fourier carece de bajas frecuencias espaciales).

Título

Procesos visuales de demodulación espacial

Resumen

Esta Tesis estudia el mecanismo visual implicado en el procesamiento de imágenes cuyas características no son accesibles a los canales o filtros del *mecanismo de primer orden* propuestos por la teoría multicanal. Esas imágenes se han denominado estímulos de segundo orden y el mecanismo implicado en su procesamiento, *mecanismo de segundo orden*. Los estímulos de segundo orden utilizados aquí son imágenes de contraste modulado (CM) y el esquema propuesto para demodular su contraste es el denominado filtro-rectificación-filtro (FRF). El propósito de la Tesis es completar algunos aspectos de ese esquema. En primer lugar, se ha probado la linealidad del mecanismo de segundo orden. En segundo lugar, se caracterizaron los filtros de la primera etapa del esquema FRF utilizando el paradigma de enmascaramiento y dos modelos de detección: canal fijo y canal óptimo (que tiene en cuenta el efecto de off-frequency looking). Se confirmó que la forma de la FTM de los canales es asimétrica y que su anchura de banda en octavas decrece con su frecuencia de pico. En tercer lugar, generalizando el paradigma de enmascaramiento al dominio de la modulación en amplitud, se caracterizaron los filtros de la segunda etapa. Para ello, se midieron los umbrales de detección de estímulos CM en los que la modulación sinusoidal del contraste fue enmascarada por ruido modulador paso-banda. Los resultados obtenidos sugieren que la segunda etapa se compone de un banco de filtros lineales solapados, selectivos a la frecuencia de modulación, que descomponen la envolvente de la imagen en el rango de 1 a 15 c/gav y cuya anchura de banda en octavas decrece con la frecuencia de pico del filtro. Así, esa estructura parece replicar la arquitectura funcional conocida del mecanismo de primer orden. Con estos resultados, se diseñó un modelo computable de demodulación visual de la amplitud que explica resultados experimentales previos y fenómenos de la percepción visual de la forma, como el agrupamiento perceptivo y la percepción de ilusiones geométricas cuyo espectro de Fourier carece de bajas frecuencias espaciales.

Palabras clave: Psicofísica visual, mecanismos de segundo orden, paradigma de enmascaramiento visual

Title

Visual demodulation processes

Abstract

The present doctoral thesis deals with the visual mechanism involved in the processing of images whose characteristics are not accessible to classic psychophysical channels (or *first-order mechanism*) proposed by multichannel theory. Images with these characteristics have been called second-order stimuli and the mechanism involved in their processing, *second-order* (or *non-Fourier*) *mechanism*. Contrast modulated images (or CM stimuli) are used here as second-order stimuli and a filter-rectify-filter (FRF) scheme has been suggested for contrast demodulation. The aim of the theoretical and experimental work conducted in this thesis is to complete some aspects of this FRF scheme and to present a workable model to explain some experimental data and perceptual phenomena. First, we tested the degree of linearity of the second-order mechanism as a whole. Second, we studied the spatial-frequency tuning properties of first-stage channels using the critical-band masking model and two detection models: fixed-channels model and best-channels model (taking the off-frequency looking effect into account). The results confirm an asymmetric shape for the channel MTF and a decrease of its relative bandwidth with peak spatial frequency. Third, we assessed the spatial-frequency tuning properties of second-stage channels, using the above mentioned masking model transferred to the amplitude-modulation domain. Modulation contrast thresholds of sinusoidal waveforms masked by band-pass noise modulators were measured. The results suggest that the second stage of FRF scheme is a modulation filterbank that decomposes the spatial envelope of images via a bank of overlapping bandpass filters, with peak frequencies ranging from about 1-15 c/deg (at the luminance level used) and relative bandwidth decreasing with peak frequency of filter. Thus, the second-stage channels seem to replicate the functional architecture of classic first-order filterbank. Finally, these results were incorporated to a workable visual model of AM demodulation to explain experimental data and perceptual phenomena as gestalt grouping and geometrical illusions in images devoid of low-spatial frequencies.

key words: visual psychophysics, second-order mechanisms, critical-band-masking paradigm

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción general	1
Capítulo 2: Aspectos matemáticos y problemas metodológicos en el estudio de los procesos visuales de demodulación espacial	8
2.1. Aspectos matemáticos básicos de la modulación y de la demodulación de señales 1D e imágenes.....	8
2.2. Problemas metodológicos relacionados con los estímulos de segundo orden.....	17
2.3. Modelos psicofísicos de segundo orden.....	20
2.4. Características del mecanismo de segundo orden. El esquema FRF.....	21
Capítulo 3: Objetivos	26
3.1. Pruebas de linealidad de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden.....	27
3.2. Caracterización anisotrópica de los filtros de primer orden mediante el modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas.....	28
3.3. Caracterización anisotrópica de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden.....	29
3.4. Propuesta de un modelo de segundo orden y explicación de resultados experimentales y fenómenos de la percepción de la forma.....	29
Capítulo 4: Paradigma experimental de enmascaramiento con ruido visual	31
4.1. El paradigma experimental de enmascaramiento.....	31
4.2. Modelo de enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas.....	31
4.2.1. Postulados del modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas....	33
4.2.2. Ecuación general del modelo de enmascaramiento.....	34
4.3. Modelo de Procesamiento.....	37
A) Ruido interno del canal.....	38

B) Función de transferencia de modulación unidimensional (FTM-1D) de los canales psicofísicos.....	39
C) Anchura de banda de los canales psicofísicos.....	41
4.4. Modelos de detección.....	42
<i>El efecto de off-frequency looking</i>	42
A) Modelo de detección de canal fijo.....	44
B) Modelo de detección de canal variable.....	45
4.6. Especificación del modelo de enmascaramiento para diferentes tipos de ruido máscara.....	45
4.6.1. Ruido blanco 1D (ruido de banda ancha o paso-todo).....	46
4.6.2. Ruido blanco 1D filtrado paso-bajo ideal.....	47
4.6.3. Ruido blanco 1D filtrado paso-alto ideal.....	48
4.6.4. Ruido blanco 1D con muesca espectral (notch).....	48
4.6.5. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda ideal.....	50
4.6.6. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda doble ideal.....	51
Capítulo 5: Metodología general	54
5.1. Sujetos.....	54
5.2. Equipo.....	54
5.3. Calibración del monitor.....	55
5.4. Estímulos.....	55
5.5. Presentación de los estímulos.....	55
<i>Técnica de entrelazado</i>	56
<i>Control experimental del contraste de una imagen</i>	56
5.6. Tarea.....	57
5.7. Características de los ensayos.....	57
<i>Experimentos de detección</i>	57
<i>Experimentos de enmascaramiento</i>	57
5.8. Curso temporal de los ensayos.....	58
5.9. Procedimiento de determinación de umbrales sensoriales.....	58

Capítulo 6: Prueba de linealidad de los mecanismos de primer y segundo orden.	60
6.1. Introducción.....	60
6.2. Prueba de linealidad con estímulos de luminancia (primer orden).....	63
Método.....	63
Resultados.....	65
Discusión.....	65
6.3. Prueba de linealidad con estímulos de contraste modulado (segundo orden)...	67
Método.....	67
Resultados.....	69
Discusión.....	71
Capítulo 7: Caracterización anisotrópica de los filtros de primer orden mediante enmascaramiento con ruido visual.....	73
7.1. Introducción.....	73
7.2. Experimentación.....	74
7.2.1. Detección de una señal inserta en ruido blanco o ruido paso-todo 1D....	74
Método.....	75
Resultados y discusión.....	77
7.2.2. Detección de una señal inserta en ruido paso-bajo y paso-alto 1D.....	78
Método.....	78
Resultados y discusión.....	79
7.2.3. Detección de una señal inserta en ruido blanco 1D con muesca espectral (notch).....	82
Método.....	82
Resultados y discusión.....	83
7.2.4. Detección de una señal inserta en ruido paso-banda 1D.....	85
Método.....	86
Resultados y discusión.....	87
7.2.5. Detección de una señal inserta en ruido paso-banda doble 1D.....	91
Método.....	91

Resultados y discusión.....	92
7.3. Ajuste del modelo de enmascaramiento y estimación de sus parámetros.....	94
7.3.1. Objetivos.....	94
7.3.2. Predicciones del modelo de enmascaramiento.....	95
7.3.3. Método.....	96
7.3.4. Resultados.....	100
7.3.4.1. Caracterización de la FTM-1D de los canales de primer orden.....	100
7.3.4.2. Potencia explicativa del modelo de enmascaramiento utilizando ruido máscara paso-banda 1D.....	101
7.3.4.3. El efecto de off-frequency looking para cada tipo de ruido.....	103
7.4. Discusión general.....	105
Capítulo 8: Caracterización anisotrópica de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden.....	119
8.1. Introducción.....	119
8.2. Experimentación.....	121
8.2.1. Detección de una señal moduladora inserta en ruido paso-banda 1D modulador.....	121
Método.....	121
Resultados y discusión.....	124
8.3. Ajuste del modelo de enmascaramiento y estimación de sus parámetros.....	127
8.3.1. Objetivo.....	127
8.3.2. Predicciones del modelo de enmascaramiento.....	128
8.3.3. Método.....	131
8.3.4. Resultados.....	132
8.4. Discusión general.....	135
Capítulo 9: Explicación cualitativa de algunos fenómenos de la visión espacial...	142
9.1. Introducción.....	142
9.2. Mecanismo visual de demodulación del contraste.....	142

9.3. Explicación cualitativa de resultados experimentales.....	143
9.4. Explicación de fenómenos de la percepción visual de la forma.....	150
<i>Ilusión de Müller-Lyer</i>	150
<i>Agrupamiento perceptivo</i>	153
Capítulo 10: Conclusiones	156
Apéndice 1	159
A.1.1. Función de contraste de una imagen de luminancia.....	159
A.1.2. Potencia de contraste de una imagen o potencia promedio.....	160
A.1.3. Contraste RMS (Root Mean Square Contrast) de una imagen (cRMS).....	160
A.1.4. Nivel de potencia de una imagen de ruido 1D equienergético (N_0).....	161
Apéndice 2	162
A.2.1. Cálculo del contraste m de una imagen para obtener un determinado cRMS	162
A.2.2. Control del contraste m de una imagen.....	165
Apéndice 3	167
A.3.1. Generación de ruido equienergético 1D y control de su nivel.....	167
A.3.1.1. Ruido blanco 1D (ruido paso-todo o de banda ancha 1D).....	169
A.3.1.2. Ruido blanco 1D filtrado paso-bajo ideal.....	171
A.3.1.3. Ruido blanco 1D filtrado paso-alto ideal.....	172
A.3.1.4. Ruido blanco 1D con muesca espectral ideal.....	173
A.3.1.5. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda ideal.....	173
A.3.1.6. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda doble ideal.....	174
A.3.2. Generación de ruido binario 2D.....	175
Apéndice 4	176
A.4.1. Enrejados sinusoidales y de onda cuadrada.....	176

A.4.2. Control del contraste de la señal en los experimentos de enmascaramiento con estímulos de primer orden.....	177
A.4.3. Cálculo de la potencia de una imagen con modulación sinusoidal de la luminancia y ventana gaussiana.....	180
Apéndice 5	182
A.5.1. Estímulos de contraste modulado sinusoidalmente y con función de onda cuadrada.....	182
A.5.2. Control de la profundidad de modulación de una imagen de contraste modulado.....	184
A.5.3. Procedimiento para enmascarar una señal moduladora con ruido modulador.....	185
A.5.4. Control de la profundidad de modulación de una señal moduladora enmascarada con ruido modulador.....	187
Apéndice 6	190
A.6.1. Procedimiento bayesiano para obtener umbrales sensoriales.....	190
A.6.2. Propiedades estadísticas del procedimiento bayesiano utilizado.....	193
Apéndice 7	197
A.7.1. Expresiones de las FTM-1D de los canales psicofísicos visuales.....	197
A.7.2. El modelo de enmascaramiento para diferentes tipos de ruido visual.....	198
A.7.2.1. Ruido paso-todo 1D.....	198
A.7.2.2. Ruido paso-bajo y paso-alto.....	199
A.7.2.3. Ruido paso-todo con muesca espectral	199
A.7.2.4. Ruido paso-banda.....	200
A.7.2.5. Ruido paso-banda doble.....	200
Apéndice 8	201
Control experimental de la técnica de entrelazado.....	201

Apéndice 9	204
A.9.1. Procedimiento de ajuste mediante mínimos cuadrados.....	204
A.9.2. Estadístico de la bondad de ajuste.....	204
Apéndice 10	205
Determinación de la frecuencia de pico del canal que maximiza la razón señal-ruido.....	205
Referencias	208

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

El sistema visual humano (SVH) es sensible a las variaciones espaciotemporales de las diferentes características de los estímulos. En efecto, desde un punto de vista fenomenológico, en la imagen que constituye el estímulo visual, se pueden apreciar variaciones de características tan diferentes como la luminancia, el contraste, la orientación y el tamaño en diferentes regiones de la imagen. Según la teoría multicanal de la visión espacial humana (Campbell y Robson 1968; Sachs, Nachmias, y Robson, 1971; Graham, 1989), estas características de los estímulos son procesadas por canales o filtros del *mecanismo de primer orden* (filtros de primer orden). Sin embargo, estudios de la segregación preatentiva de la textura (Bergen y Julesz, 1983), de detección de la modulación estática del contraste (Burton, 1973, Henning, Hertz y Broadbent, 1975) y en movimiento (Chubb y Sperling, 1988) han mostrado que existen características de los estímulos que no son directamente accesibles mediante el procesamiento por los filtros de primer orden. Las imágenes con estas características se han denominado estímulos de segundo orden y el mecanismo visual implicado en su procesamiento, *mecanismo de segundo orden*. Por lo tanto, dependiendo del mecanismo a estudiar, los estímulos utilizados se han clasificado en dos grupos: estímulos de primer orden y de segundo orden (Cavanagh y Mather, 1989). Los estímulos de primer orden son aquellos en los que las variaciones (o modulaciones) lo son de la luminancia o del color (véase la Figura 1.1, imagen L). Los estímulos de segundo orden o estímulos “non-Fourier” (Chubb y Sperling, 1988; Wilson, 1999) son aquellos en los que las variaciones (o modulaciones) lo son del contraste local, de la orientación local o de la frecuencia local de una determinada función portadora. Cuando el estímulo de segundo orden consiste en una modulación del contraste local de una función portadora, se le denomina *estímulo de contraste modulado* (CM) (véase la Figura 1.1, imagen CM) o estímulo de amplitud modulada (AM) (Burton, 1973, Henning, Hertz y Broadbent, 1975, Jamar y Koenderink, 1985; Derrington y Badcock, 1986; Sutter, Sperling y Chubb, 1995; Cropper, 1998; Schofield y Georgeson, 1999, 2003).

Cuando consiste en la modulación de la orientación local de una función portadora o de la orientación de los elementos que componen una determinada textura, se le denomina *estímulo de orientación modulada* (OM) (véase la Figura 1.1, imagen OM) (Kingdom, Keeble y Moulden, 1995; Kwan y Regan, 1998; Kingdom y Keeble, 1996, 1999; Landy y Oruc, 2002; Kingdom, Prins y Hayes, 2003). Finalmente, cuando consiste en la modulación de la frecuencia local de una función portadora, se le denomina *estímulo de frecuencia modulada* (FM) (véase la Figura 1.1, imagen FM) (Stromeyer y Klein, 1975; Jamar, Campagne y Koenderink, 1982; Arsenault, Wilkinson y Kingdom, 1999). En esta Tesis se estudiarán los procesos visuales implicados en la percepción de la modulación del contraste espacial, y en consecuencia, para el estudio del mecanismo de segundo orden encargado de la demodulación se trabajará únicamente con estímulos CM (cuya caracterización formal aparecerá más adelante).

Aunque el cuerpo de las investigaciones psicofísicas se ha centrado en el estudio del mecanismo visual de primer orden, sin embargo, es conocido que el ser humano es capaz de segregar diferentes texturas (Julesz, 1971; Bergen y Julesz, 1983), es capaz de encontrar los límites entre distintos tipos de texturas, es capaz de notar variaciones en su contraste, en la orientación de sus elementos y en la variación de la frecuencia espacial de la textura. Esto lleva a formular al menos tres preguntas:

- a) ¿Cómo el SVH percibe la modulación en los estímulos de segundo orden?
- b) ¿Existen mecanismos independientes para procesar la información de primer y segundo orden?
- c) Si existen, ¿cuáles son las características del mecanismo de segundo orden y de las operaciones que realiza sobre el estímulo?

Algunas de estas cuestiones están ya parcialmente contestadas, pero otras quedan sin contestar y a dilucidarlas se dedica esta Tesis.

Con respecto a la primera pregunta, es conocido que el SVH percibe la modulación de los estímulos de segundo orden, pero cómo lo hace es una de las cuestiones que todavía no están completamente resueltas (Wilson, 1999; Chubb, Olzak y Derrington, 2001).

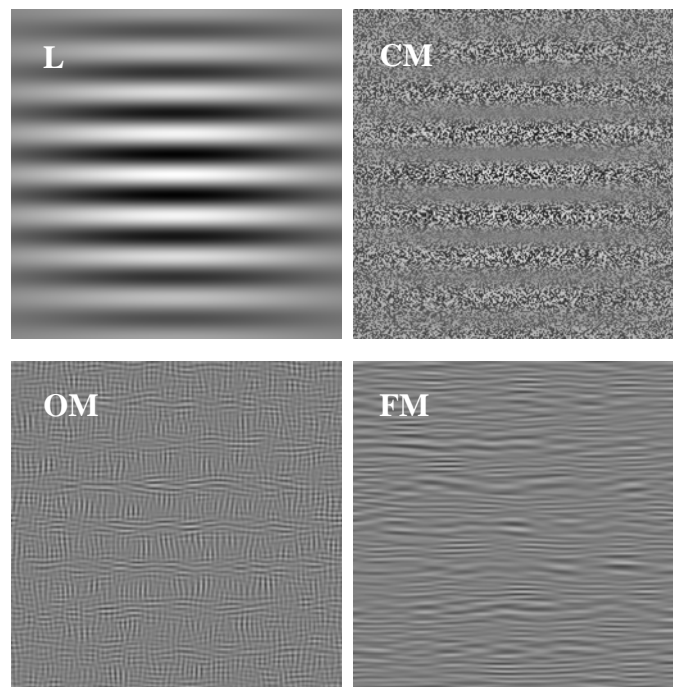


Figura 1.1. Ejemplos de estímulos de primer y segundo orden. L, estímulo de primer orden con modulación sinusoidal de la luminancia con ventana gaussiana bidimensional (2D). CM, estímulo de segundo orden cuya modulación del contraste de la textura (ruido binario) es una señal sinusoidal con ventana gaussiana 2D. OM, estímulo de segundo orden con modulación de la orientación de la textura. FM, estímulo de segundo orden con modulación de la frecuencia espacial de la textura. Las imágenes OM y FM han sido generadas según el procedimiento descrito en Landy y Oruc (2002).

En general se ha supuesto que el SVH en algún momento del procesamiento del estímulo de segundo orden realiza un proceso de demodulación espacial a partir del cuál se recupera la modulación que es percibida en el estímulo (Chubb y Sperling, 1988, Daugman y Downing, 1995). (Los conceptos de modulación y de demodulación se desarrollarán en el Capítulo 2).

Con respecto a la segunda pregunta, numerosos estudios psicofísicos han mostrado la posibilidad de que el SVH sea capaz de procesar los estímulos de primer y segundo orden por mecanismos independientes (Chubb y Sperling, 1988; Cavanagh y Mather, 1989; Wilson, Ferrera y Yo, 1992; Derrington, Badcock y Henning, 1993; Ledgeway y Smith, 1994; Scott-Samuel y Georgeson, 1995; Sutter et al., 1995; Lu y Sperling, 1996; Arsenault

et al., 1999; Schofield y Georgeson, 1999, 2003; Schofield, 2000; Landy y Oruc, 2002; Kingdom et al., 2003). Existen, además, evidencias que muestran que para discriminar estímulos de segundo orden se necesita un mayor tiempo de presentación que el requerido para la discriminación de estímulos de primer orden (Lin y Wilson, 1996), lo que parece reflejar un proceso adicional de demodulación que causa que el procesamiento de los estímulos de segundo orden requiera más tiempo (Wilson, 1999; Serrano-Pedraza y Sierra-Vázquez, 2003; Sierra-Vázquez, Serrano-Pedraza y Luna, 2005).

La existencia de mecanismos independientes para procesar estímulos de primer y segundo orden, ha sido corroborada en estudios fisiológicos, y mediante técnicas de neuroimagen. Registros neuronales en el gato han revelado la existencia de células sensibles a modulaciones del contraste de la textura, diferentes de las células que responden únicamente a modulaciones de la luminancia (Zhou y Baker, 1993, 1994; Mareschal y Baker, 1998a, 1998b, 1999). Estudios de neuroimagen sugieren que los estímulos de primer y segundo orden son procesados por mecanismos diferentes (Smith, Greenlee, Singh, Kraemer y Hennig, 1998). Aunque estudios psicofísicos revelan una cierta interacción entre los dos mecanismos (Dakin, Williams y Hess, 1999; Smith y Scott-Samuel, 2001; Ellemberg, Allen y Hess, 2004).

Recientemente se ha mostrado que aunque las imágenes naturales contengan muy poca información de segundo orden comparada con la información de primer orden, existe en estas imágenes información relevante que estimula preferentemente al mecanismo de segundo orden (Schofield, 2000; Johnston y Baker, 2004) y, por lo tanto, la existencia de dos mecanismos independientes para estímulos de primer y segundo orden tendría una utilidad real. En este trabajo se adoptará la postura más generalizada de independencia de mecanismos en el procesamiento de estímulos de primer y segundo orden.

Respecto a la tercera pregunta, para el mecanismo de segundo orden se ha propuesto un esquema básico que consiste en que la imagen es analizada por un banco de canales lineales (filtros de la primera etapa) seguidos por un proceso no lineal de rectificación (completa o parcial) que a su vez está seguido por otro banco de canales lineales (filtros de la segunda etapa) (Chubb y Sperling, 1988; Sutter, Beck y Graham, 1989; Malik y Perona, 1990; Wilson et al., 1992; Graham, Sutter y Venkatesan, 1993; Chubb, Econopouly y

Landy, 1994; Schofield, 2000; Mussap, 2001; Landy y Oruc, 2002). Este esquema básico denominado filtro-rectificación-filtro (FRF) es el más extendido a la hora de explicar cómo el ser humano es capaz de percibir la modulación en los estímulos de segundo orden (Schofield, 2000; Chubb et al., 2001) (En el apartado 2.4 del Capítulo 2 de esta Tesis se puede ver desarrollado este esquema FRF). Como se ha dicho anteriormente, en este trabajo se adoptará la postura más extendida que acepta la existencia de dos mecanismos independientes para primer y segundo orden. También se supondrá que los filtros de la primera etapa son idénticos a los filtros de primer orden y que, por tanto, aunque los dos mecanismos procesan información diferente, comparten recursos de procesamiento.

Aunque el cuerpo de conocimientos acerca de los mecanismos de segundo orden ha sido obtenido a partir del estudio de la percepción del movimiento (Chubb et al., 2001), esta Tesis estudia las características de estos mecanismos en el procesamiento de estímulos estáticos de segundo orden. En particular, el objetivo general de esta Tesis es la *caracterización de las propiedades de los filtros (o canales) del esquema FRF que permiten al ser humano percibir la modulación espacial del contraste de los estímulos de segundo orden.*

En lo que sigue se realiza un esbozo del contenido de cada capítulo de esta Tesis.

Aunque la importancia de la modulación y demodulación de señales es conocida en psicofísica sensorial desde la difusión de la teoría de detección de señales (TDS) (Green y Swets, 1974), en el Capítulo 2 se revisan los aspectos matemáticos relacionados con este asunto. Éstos son necesarios para el diseño de los estímulos y la modelización de procesos de segundo orden. Además, en este Capítulo se describen los estímulos particulares de segundo orden que se van a utilizar a lo largo de la Tesis, se plantean los problemas metodológicos relacionados con estos estímulos y, puesto que existe una cierta dispersión en la literatura de los diferentes esquemas que modelizan los procesos visuales de segundo orden, se fija el esquema FRF para el mecanismo de segundo orden.

En el Capítulo 3 se fijan los objetivos de la Tesis.

En el Capítulo 4 se describe el paradigma experimental de enmascaramiento utilizado para la consecución de los objetivos, a la vez que se expone formalmente un modelo de

enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas bajo el cual se ampara dicho paradigma.

En el Capítulo 5 se describe la metodología general común en todos los experimentos de la Tesis, es decir, los sujetos, el equipo, la técnica de presentación de estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales.

En el Capítulo 6 se pone a prueba la linealidad de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden (primer objetivo de la Tesis). Esta prueba de linealidad es necesaria ya que el modelo de enmascaramiento utilizado para caracterizar estos filtros requiere que éstos se comporten de un modo lineal.

En el Capítulo 7 se exponen los experimentos de enmascaramiento realizados con estímulos de primer orden y se ajustan los resultados a las predicciones del modelo de enmascaramiento. A partir de estos ajustes, se decide entre dos formas funcionales para la forma de la FTM-1D de los filtros de primer orden y se estima la anchura de banda de éstos (segundo objetivo de la Tesis). Con estos experimentos se pone a prueba el modelo de enmascaramiento (tercer objetivo de la Tesis) para posteriormente poder aplicarlo a la caracterización de los filtros de la segunda etapa.

En el Capítulo 8 se exponen los experimentos de enmascaramiento realizados con estímulos de segundo orden de tal modo que utilizando el mismo modelo de enmascaramiento que el utilizado para caracterizar los filtros de primer orden, se decide entre dos formas funcionales y se estima la anchura de banda de la FTM-1D de los filtros de la segunda etapa (cuarto objetivo de la Tesis).

En el Capítulo 9 se propone un modelo tentativo para el mecanismo de segundo orden basado en el esquema FRF pero con los filtros caracterizados en esta Tesis (quinto objetivo de esta Tesis). A partir de este modelo se da una explicación cualitativa de algunos resultados experimentales previos y de algunos fenómenos de la percepción visual de la forma.

Finalmente, en el Capítulo 10 se exponen las conclusiones, parte de las cuáles se han podido leer en el Resumen que abre la Tesis.

Aunque el nivel formal no es elevado, para facilitar la lectura de este trabajo de modo que páginas de fórmulas no interrumpan el curso de la exposición, la mayor parte de las expresiones formales, demostraciones y procedimientos metodológicos aparecen en los Apéndices situados al final de esta Tesis.

Capítulo 2

ASPECTOS MATEMÁTICOS Y PROBLEMAS METODOLÓGICOS EN EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS VISUALES DE DEMODULACIÓN ESPACIAL

A lo largo de este Capítulo se van a describir los aspectos matemáticos básicos relativos a la modulación y la demodulación de señales e imágenes, los estímulos particulares de segundo orden que se van a utilizar en los experimentos de la Tesis, los problemas metodológicos que éstos plantean, y los modelos psicofísicos que intentan explicar como el ser humano es capaz de acceder a la modulación en estímulos de segundo orden.

2.1. Aspectos matemáticos básicos de la modulación y de la demodulación de señales 1D e imágenes

La modulación de una señal es una variación espaciotemporal de alguna característica de una función portadora. En particular, como se describió en el Capítulo 1, cuando la modulación de una imagen es una variación de la luminancia, entonces el estímulo se considera de primer orden. Sin embargo, si la modulación es una variación del contraste local, de la frecuencia espacial, o de la orientación de una función portadora, entonces el estímulo se considera de segundo orden. Este apartado se centra en la caracterización de los estímulos de segundo orden, prestando especial atención a los estímulos de contraste modulado (CM), también llamados estímulos de amplitud modulada (AM), que son los estímulos que se van a utilizar en la Tesis para estudiar los mecanismos de procesamiento de segundo orden.

Estímulos de contraste modulado (CM) o de amplitud modulada (AM)

El término amplitud modulada procede del campo de las telecomunicaciones, y desde ese campo ha sido importado para ser utilizado en investigaciones de los sistemas auditivo y visual humano. Las señales AM consisten en la modulación de la amplitud de una

determinada función portadora. Para precisar el concepto de señal AM vamos a empezar por su caracterización 1D. La expresión general de una señal modulada 1D es

$$f(x) = a(x)p(x), \quad -1 \leq f(x) \leq 1 \quad (2.1)$$

donde a se denomina *amplitud instantánea* (en el caso de señales temporales) o *amplitud local* (en el caso de señales espaciales); $|a|$ se denomina envolvente de la señal modulada; y donde p es la función portadora ($-1 \leq p(x) \leq 1$).

En nuestros estímulos, la amplitud instantánea o local está linealmente relacionada con una determinada función moduladora M , es decir, $a(x) = k[1 + M(x)]$. La función moduladora puede ser cualquier función periódica o aperiódica con la condición de que $M(x) \geq -1$ para que a sea siempre no negativa, y donde k es una constante denominada *contraste de la función portadora*. En lo sucesivo, y puesto que $a(x) \geq 0$, la amplitud local de la señal modulada f será igual a la envolvente.

Supóngase que la función moduladora M es una función sinusoidal, es decir, $M(x) = m_f \cos(2\pi u_m x + \theta_m)$, donde u_m , θ_m y m_f tienen valores constantes, y son, respectivamente, la frecuencia espacial, la fase y el contraste (profundidad de modulación o porcentaje de modulación) de la función moduladora. Y supóngase que la función portadora p también es una función sinusoidal de su argumento, es decir, $p(x) = \cos(\phi(x))$, donde ϕ se denomina *fase instantánea* o *fase local*. En general para señales AM se suele utilizar la siguiente fase local $\phi(x) = 2\pi u_p x + \theta_p$, donde u_p y θ_p tienen valores constantes y son la frecuencia espacial y la fase inicial de la función portadora, respectivamente. Por lo tanto, la señal AM-1D quedaría expresada del siguiente modo

$$f(x) = k[1 + m_f \cos(2\pi u_m x + \theta_m)] \cos(2\pi u_p x + \theta_p), \quad (2.2)$$

para $u_p \geq 2u_m$, $m_f \in [0,1]$ y $k \in [0,0.5]$. En términos técnicos, ésta es una señal con portadora transmitida y doble banda lateral (DSB-TC, Double Sideband with Transmission Carrier).

En la Figura 2.1 aparece representada la señal modulada (línea negra), y la envolvente de esta señal (línea roja).

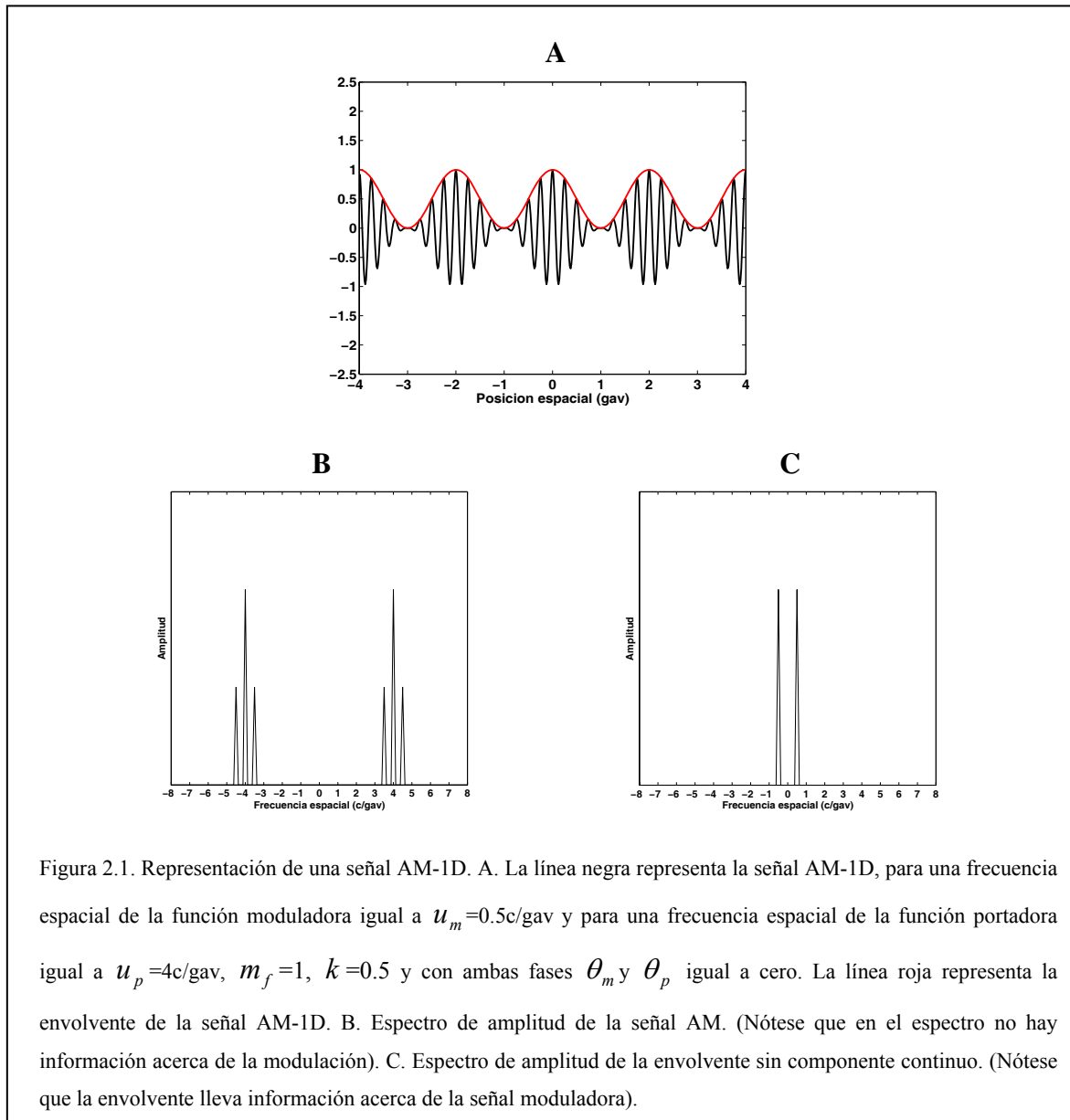


Figura 2.1. Representación de una señal AM-1D. A. La línea negra representa la señal AM-1D, para una frecuencia espacial de la función moduladora igual a $u_m=0.5c/gav$ y para una frecuencia espacial de la función portadora igual a $u_p=4c/gav$, $m_f=1$, $k=0.5$ y con ambas fases θ_m y θ_p igual a cero. La línea roja representa la envolvente de la señal AM-1D. B. Espectro de amplitud de la señal AM. (Nótese que en el espectro no hay información acerca de la modulación). C. Espectro de amplitud de la envolvente sin componente continuo. (Nótese que la envolvente lleva información acerca de la señal moduladora).

Nótese, que la envolvente de la señal definida por la ecuación (2.2) es $a(x) = k[1 + m_f \cos(2\pi u_m x + \theta_m)]$.

La generalización de las señales de amplitud modulada unidimensional (AM-1D) a señales AM-2D es directa, es decir, la expresión general para una señal 2D modulada es

$$f(x, y) = a(x, y)p(x, y), \quad -1 \leq f(x, y) \leq 1 \quad (2.3)$$

donde a es la amplitud local o envolvente espacial 2D de la señal modulada f , y p es la función portadora cuya amplitud o contraste es modulado. Como en el caso unidimensional, la envolvente está relacionada linealmente con la función moduladora M , es decir, $a(x, y) = k[1 + M(x, y)]$; donde la función moduladora puede ser cualquier función periódica o aperiódica con la condición $M(x, y) \geq -1$;

Otra vez, para fijar ideas, supóngase como en el caso AM-1D que la función moduladora M es una función sinusoidal horizontal, y que la función portadora es también una función sinusoidal horizontal. Entonces la señal AM-2D sería

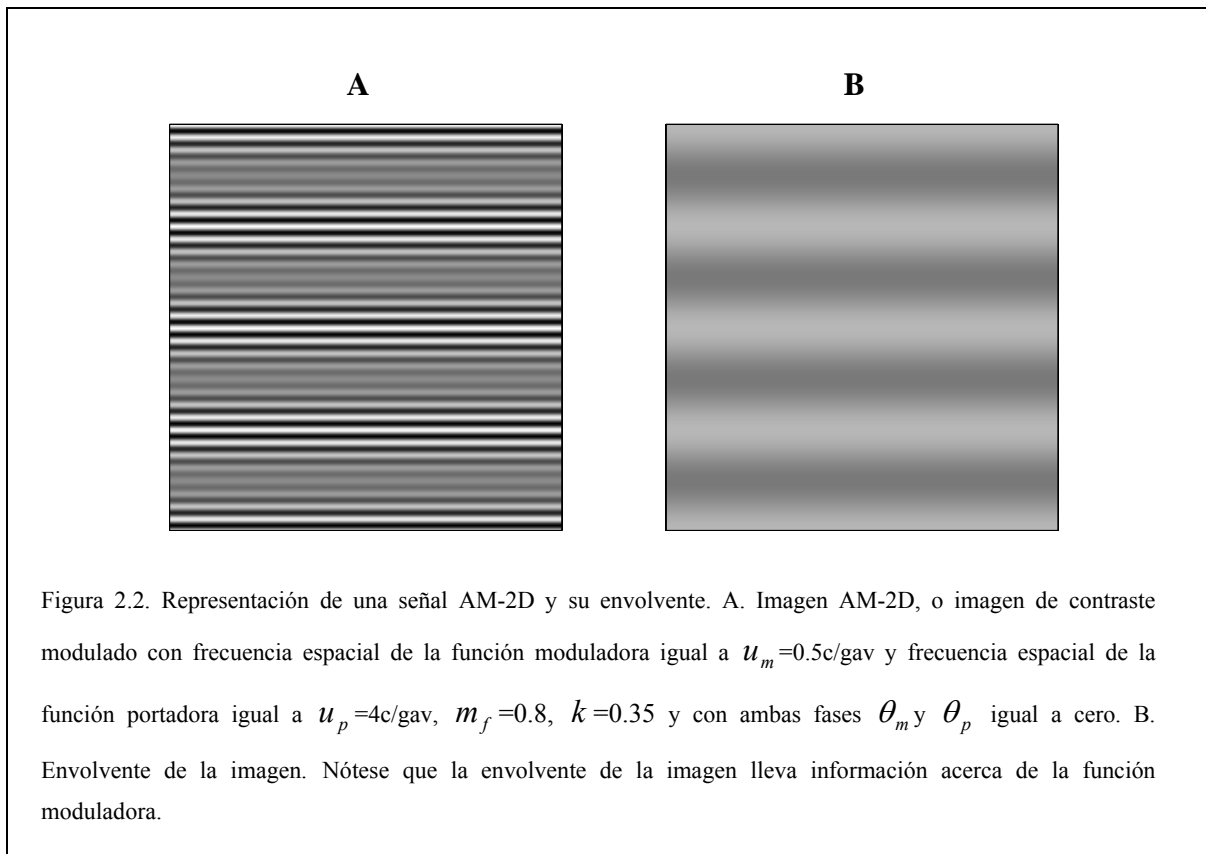
$$f(x, y) = k[1 + m_f \cos(2\pi u_m y + \theta_m)] \cos(2\pi u_p y + \theta_p), \quad (2.4)$$

para $u_p \geq 2u_m$, $m_f \in [0, 1]$ y $k \in [0, 0.5]$.

Para convertir esta señal modulada 2D en una imagen de luminancia hay que realizar la transformación siguiente

$$L(x, y) = L_0[1 + f(x, y)], \quad (2.5)$$

donde L_0 es la luminancia media. Esta misma expresión fue utilizada por Henning et al., (1975) en el estudio en el que ponen en duda la existencia de canales visuales independientes de primer orden. En el panel izquierdo de la Figura 2.2 puede verse la imagen AM, también denominada imagen de contraste modulado (CM) y en el panel derecho se muestra la envolvente 2D de la imagen $a(x, y) = k[1 + m_f \cos(2\pi u_m y + \theta_m)]$. En la imagen AM de la Figura 2.2 se percibe un enrejado de alta frecuencia cuyo contraste es modulado espacialmente. Nótese, sin embargo, que esta modulación del contraste no se encuentra explícita en el espectro de Fourier de la imagen (cuyo perfil se puede ver en la Figura 2.1 B), y por lo tanto, los canales de luminancia (o filtros primer orden) son ciegos a esta modulación como ya se dijo en el Capítulo 1. Por ello, el problema que se plantea es cómo el SVH es capaz de percibir esta modulación del contraste, es decir, como el SVH demodula la imagen AM.



Estimación de la envolvente de señales 1D e imágenes

En los estímulos utilizados para estudiar el mecanismo de segundo orden la envolvente es conocida. Un problema diferente es cómo un sistema de procesamiento obtiene la envolvente. En efecto, no siempre se conoce la expresión formal de una señal modulada; y aunque conocida, no siempre aparece del modo indicado en las ecuaciones (2.1) y (2.3), esto es, con la envolvente explícita. Estimar la envolvente de una señal dada es un problema clásico en Teoría de la Señal, problema que recibe el nombre de *demodulación de la amplitud*, y los algoritmos propuestos para solucionar este problema se denominan *algoritmos de demodulación*. El problema es complicado porque la solución para una señal real dada no es única (Loughlin y Tacer, 1996), es decir, existen infinitos pares de moduladora y portadora cuyo producto de modulación es igual a la señal real dada. En el caso unidimensional se han propuesto numerosas soluciones para resolver este problema (Oppenheim, Willsky y Hamid Nawab, 1998). La solución clásica es la que utiliza el

concepto de la señal analítica definida por Gabor (1946), que se basa en el cálculo de la transformada de Hilbert de la señal real.

Sea f una señal real 1D. La señal analítica correspondiente a f , \tilde{f} , tiene la siguiente expresión (Gabor, 1946, Bracewell, 1978)

$$\tilde{f}(x) = f(x) + iF_{\text{Hi}}(x), \quad (2.6)$$

donde $F_{\text{Hi}}(x)$ es la transformada de Hilbert 1D de la señal real f , definida del siguiente modo (véase Bracewell, 1978)

$$F_{\text{Hi}}(x) = \frac{1}{\pi} \text{v.p.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x')}{x-x'} dx', \quad (2.7)$$

donde v.p. simboliza el valor principal de Cauchy. A partir de la señal analítica, la envolvente se obtiene calculando el módulo de ésta, es decir

$$a(x) = |f(x) + iF_{\text{Hi}}(x)|, \quad (2.8)$$

o lo que es lo mismo,

$$a(x) = \sqrt{f^2(x) + F_{\text{Hi}}^2(x)}. \quad (2.9)$$

Las ecuaciones (2.8) y (2.9) proporcionan la definición formal de la envolvente de una señal real 1D como el módulo de su correspondiente señal analítica.

Sin embargo, la envolvente estimada a partir del cálculo de la señal analítica no siempre corresponde exactamente con la forma de la función moduladora ni con la definición cualitativa e intuitiva de envolvente, es decir, *el contorno dentro del cuál la señal modulada esta contenida o también la función lisa que envuelve la señal modulada*. En la Figura 2.3 se representan las estimaciones de la envolvente de cuatro señales AM-1D utilizando el método de la señal analítica (véase la ecuación (2.9)). Las señales moduladas son: a) una señal cuyas funciones moduladora y portadora son sinusoides (ecuación (2.2)); b) una señal denominada “beats” o pulsaciones, generada a partir de la suma de dos funciones sinusoidales con frecuencias espaciales muy próximas, en la que la función portadora es una función sinusoidal con unas características particulares (véase en Hartmann, 1998 la ecuación (17.7)) y la función moduladora es una función sinusoidal rectificadas completa; c) una señal con función moduladora sinusoidal y cuya función

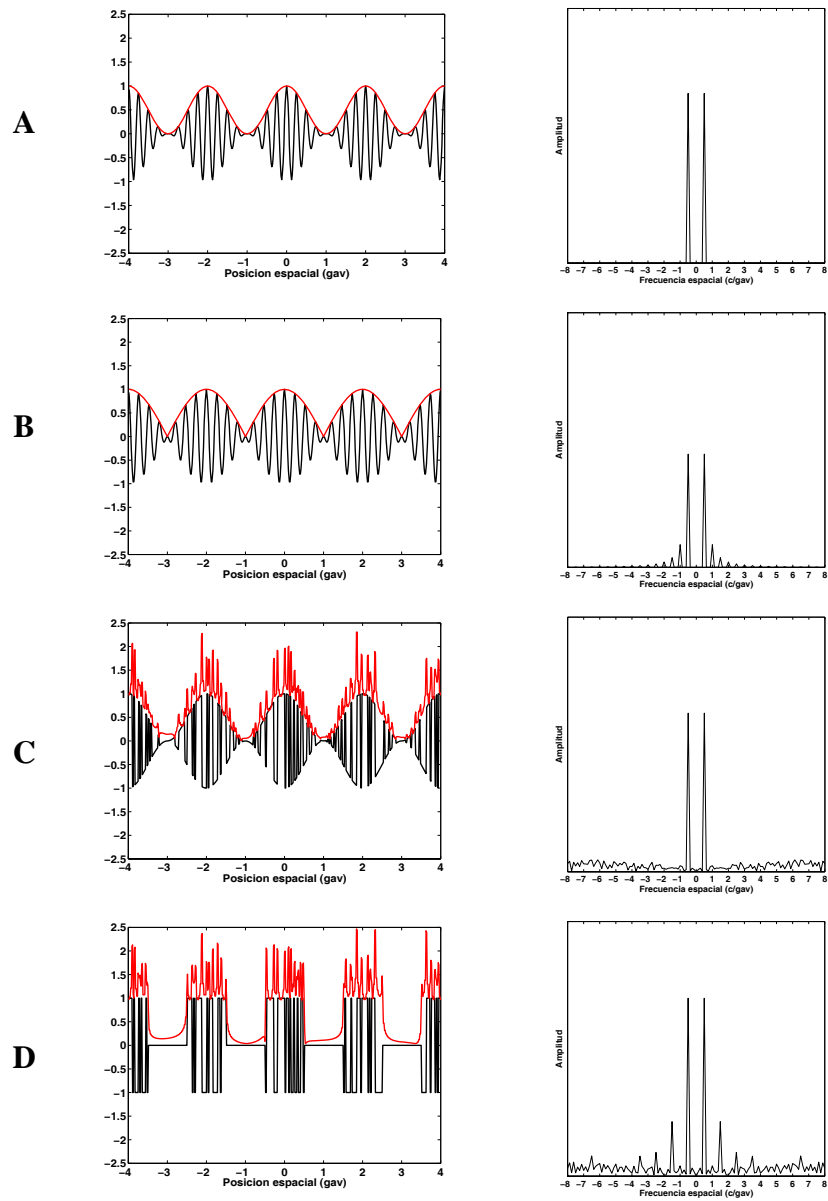


Figura 2.3. Estimación de la envolvente de señales AM-1D mediante el método de la señal analítica. En la columna izquierda, con línea negra se representa la señal modulada, y con línea roja la estimación de la envolvente. En la columna derecha se representa el espectro de amplitud de la envolvente estimada. A. Moduladora: función sinusoidal. Portadora: función sinusoidal. B. Moduladora: función sinusoidal rectificada completa. Portadora: función sinusoidal. C. Moduladora: función sinusoidal. Portadora: ruido binario. D. Moduladora: función de onda cuadrada. Portadora: ruido binario.

portadora es ruido binario; y d) una señal con función moduladora en forma de onda cuadrada y cuya función portadora es ruido binario.

Como se puede ver en esta Figura, cuando la función portadora es sinusoidal, la forma de la envolvente estimada a partir de la transformada de Hilbert se corresponde exactamente con la forma de la función moduladora y con la definición cualitativa de envolvente. Por el contrario, la estimación de la envolvente cuando la función portadora es ruido binario no coincide con la envolvente intuitiva tal y como se ha definido anteriormente (aunque en el espectro de amplitud de la envolvente estimada se puede ver que ésta transporta información acerca de la función moduladora).

Como en el caso de las señales 1D, para las señales 2D (imágenes) han sido propuestos diferentes procedimientos para estimar su envolvente, entre otros DESA (Discrete Energy Separation Algorithm) (Maragos y Bovik, 1995), el algoritmo AMPM (Daugman y Downing, 1995), las diferentes versiones de la transformada de Hilbert 2D direccional (Hahn, 1996), el algoritmo denominado de “demodulación natural” (“vortex operator”, Larkin, Bone y Oldfield, 2001), y el procedimiento algorítmico basado en el cálculo de la señal monogénica (Felsberg y Sommer, 2001).

Como en el caso 1D, la recuperación de la envolvente en señales moduladas 2D tampoco tiene por qué coincidir con la superficie intuitiva que “envuelve” la señal modulada. La solución más sofisticada para estimar la envolvente de imágenes, que solventa los problemas de otros algoritmos, es la utilización de la señal monogénica, el análogo matemático de la señal analítica para señales multidimensionales (Felsberg y Sommer, 2001). En particular, la envolvente 2D se obtiene a partir del módulo de la señal monogénica obtenida a partir de la transformada de Riesz (Stein, 1970) (generalización isotrópica multidimensional de la Transformada de Hilbert unidimensional). En la Figura 2.4 se puede ver la aplicación de este procedimiento de estimación de la envolvente a cuatro imágenes AM: A) imagen en la que la función moduladora y la función portadora son sinusoides (véase ecuaciones (2.4) y (2.5)); B) imagen (beats o pulsaciones) en la que la función moduladora es una función sinusoidal rectificadora y la función portadora es un senoide con unas características particulares (véase en Hartmann, 1998, ecuación (17.7)); C) imagen en la que la función moduladora es un senoide y la función portadora es ruido

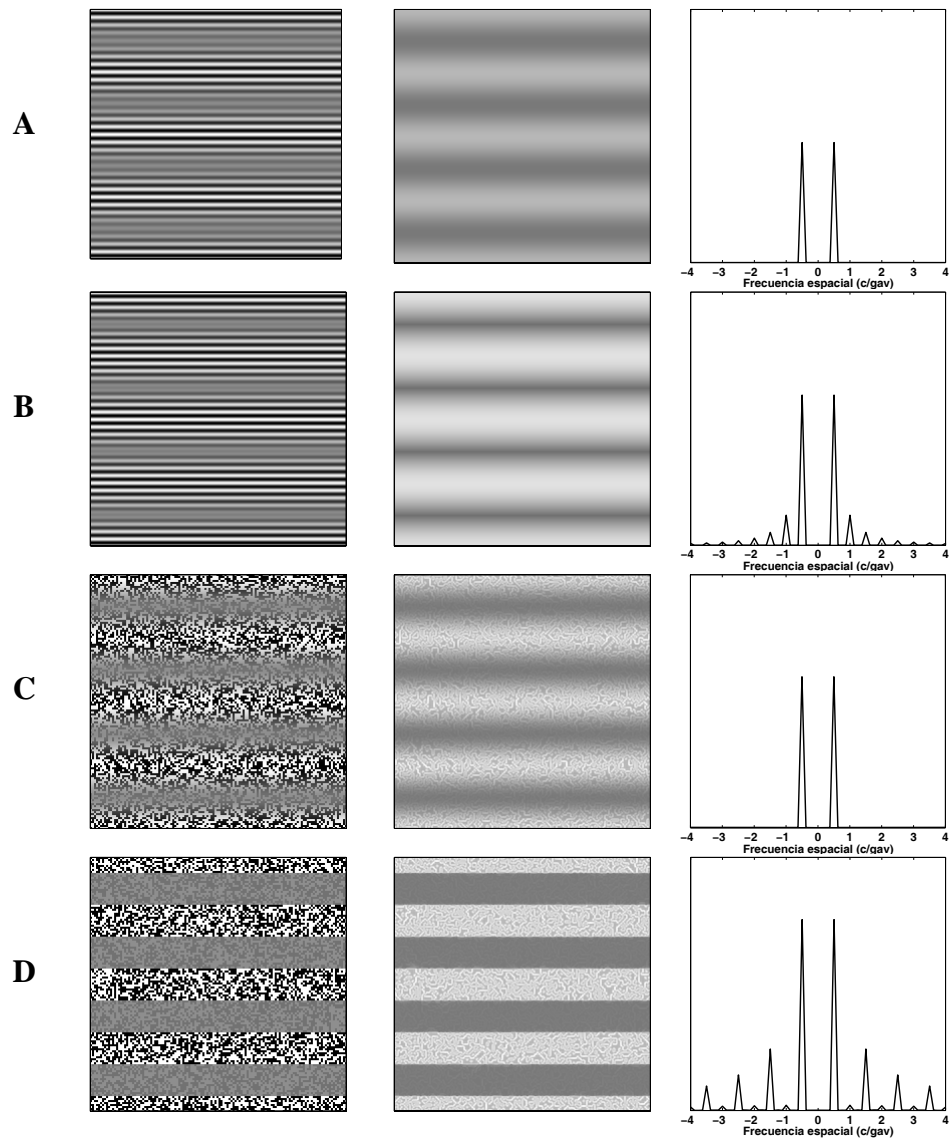


Figura 2.4. Estimación de la envolvente de señales AM-2D mediante el modulo de la correspondiente señal monogénica. En la columna izquierda se representan las imágenes AM o de contraste modulado (CM). En la columna central se representa la estimación de la envolvente 2D de cada imagen AM. En la columna derecha se representa el espectro de amplitud de la envolvente estimada. A. Moduladora: función sinusoidal; portadora: función sinusoidal. B. Moduladora: función sinusoidal rectificada completa; portadora: función sinusoidal. C. Moduladora: función sinusoidal; portadora: ruido binario. D. Moduladora: función de onda cuadrada; portadora: ruido binario.

binario 2D (véase el Apéndice A.3.2); y D) imagen en la que la función moduladora es una función de onda cuadrada y la función portadora es ruido binario. Como se puede ver en esta Figura, la estimación de la envolvente es perfecta cuando la portadora es un senoide, sin embargo cuando la función portadora está compuesta por ruido binario la estimación de la envolvente introduce algo de ruido. Como en el caso 1D, el espectro de amplitud de la envolvente estimada lleva información acerca de la función moduladora.

Sin embargo, no es factible que el SVH estime la envolvente como lo hacen los procedimientos matemáticos citados, aunque cualquiera de esos procedimientos (con preferencia por el método de la señal monogénica) son útiles para estimar la envolvente de una imagen dada. En esta Tesis se entiende por demodulación espacial la recuperación de la modulación de alguna característica espacial de la imagen de segundo orden por parte del SVH. En particular, *se entiende por demodulación espacial del contraste la recuperación de la modulación del contraste obtenida a partir de la envolvente de la imagen CM*. En el apartado 2.4 se propondrá un esquema FRF (filtro-rectificación-filtro) para explicar la forma en que el SVH es capaz de percibir la modulación en las imágenes de segundo orden, es decir, cómo demodula la variación espacial del contraste de la imagen. Más adelante se mostrará que según este esquema FRF, cuando la imagen de contraste modulado tiene como función portadora ruido binario, la salida de la rectificación es aproximadamente la envolvente intuitiva y ésta es una de las razones por la que se eligió ruido binario como función portadora en los experimentos con estímulos de segundo orden. Hay que indicar, no obstante, que si se utiliza como función portadora un enrejado sinusoidal, aunque la salida de la rectificación no se corresponde exactamente con la envolvente intuitiva, a partir de la salida filtrada rectificada se puede recuperar también la modulación.

2.2. Problemas metodológicos relacionados con los estímulos de segundo orden

Como se ha visto en el Capítulo 1, aunque para estudiar el mecanismo de segundo orden se han diseñado diferentes tipos de estímulos: estímulos con orientación modulada (OM), estímulos con frecuencia modulada (FM) y estímulos con contraste modulado (CM), en

esta Tesis nos centraremos únicamente en la descripción de este último tipo de estímulos ya que éstos son utilizados en los experimentos de esta Tesis.

Existe en la literatura una gran variedad de estímulos de contraste modulado o amplitud modulada utilizados para el estudio de los procesos visuales de segundo orden. Estímulos típicamente utilizados son los ya mencionados “beats” o pulsaciones (véase la Figura 2.4, imagen B) (Burton, 1973), que son un caso particular de estímulo AM pero en los que la función portadora no se transmite, es decir, no aparece en su espectro de amplitud (estos estímulos pueden ser generados, como se ha visto, sumando dos enrejados sinusoidales próximos en frecuencia espacial). En general, los estímulos CM más utilizados son aquellos en los que la función portadora es transmitida. En ellos, el tipo de señales moduladoras habitualmente utilizadas son las funciones sinusoidales. Por el contrario, existe una gran variedad de funciones portadoras utilizadas, teniendo cada una de ellas ventajas e inconvenientes. Las funciones portadoras pueden ser periódicas o aperiódicas. Un tipo de función portadora periódica muy utilizada son los enrejados sinusoidales (Henning et al., 1975, Jamar y Koenderink, 1985; Derrington y Badcock, 1986; Cropper, 1998;). Sin embargo, hay datos experimentales que muestran que el uso de este tipo de portadora en imágenes CM con movimiento introduce artefactos de primer orden (Derrington et al., 1993); es decir, en el estímulo de segundo orden aparece una modulación de luminancia de la misma frecuencia que la modulación del contraste. Esta modulación de la luminancia sería detectada por los filtros de primer orden, dificultando la interpretación de resultados experimentales. Tipos de portadoras aperiódicas utilizadas son ruido blanco filtrado paso-banda (Sutter et al., 1995; Dakin y Mareschal, 2000), ruido binario, ruido blanco filtrado paso-alto, y ruido $1/f$ (ruido rosa) (Schofield y Georgeson, 2003). Recientemente se ha mostrado que este último tipo de ruido ($1/f$) introduce artefactos de primer orden cuando la frecuencia de la función moduladora es alta (Schofield y Georgeson, 2003). Sin embargo, es importante destacar que la sensibilidad del sistema visual a la profundidad de modulación o modulación del contraste (en adelante SMC) es similar con independencia del tipo de función portadora utilizada (Schofield y Georgeson, 2003).

El tipo particular de función portadora que se va a utilizar en esta Tesis en los experimentos con estímulos de contraste modulado es el ruido binario (véase el Apéndice A.3.2) que es una portadora ampliamente utilizada en el estudio de los procesos visuales de segundo orden. La ventaja que tiene el usar ruido binario como función portadora es que permite que la demodulación sea perfecta (Schofield y Georgeson, 1999, 2003), es decir, un rectificado completo del estímulo de segundo orden recuperaría completamente la envolvente del estímulo (véase la confirmación de esta afirmación en la Figura 2.5 más adelante). Por otro lado, otra ventaja que tiene su utilización, es que estudios previos en los que se ha utilizado ruido binario como función portadora (Smith y Ledgeway, 1997, 1998; Schofield y Georgeson, 1999, 2003), nos da la posibilidad de comparar nuestros resultados con los de éstos. Sin embargo, la utilización de este tipo de portadora requiere un amplio control experimental, ya que puede generar diferentes artefactos de primer orden que dificultarían la interpretación de los resultados. A continuación se enumeran los problemas planteados por la utilización de este ruido como función portadora, y las soluciones adoptadas en cada caso:

a) Según Smith y Ledgeway (1997 y 1998), la utilización de ruido binario estático como función portadora en estímulos de segundo orden con movimiento introduce artefactos de primer orden. Sin embargo, ha sido mostrado posteriormente que el uso de ruido binario estático no introduce dichos artefactos (Benton y Johnston, 1997; Lu y Sperling 2001). En todo caso, en esta Tesis solamente se trabajará con estímulos CM cuya modulación del contraste es estática.

b) Un problema que puede darse cuando se utiliza este tipo de portadora es el del número de píxeles por unidad de ruido binario, ya que un número muy pequeño de píxeles por unidad de ruido podría introducir artefactos de primer orden en el estímulo (Schofield y Georgeson, 1999). En esta Tesis se ha solucionado este problema utilizando cuatro píxeles por muestra de ruido binario tal y como se ha hecho anteriormente en experimentos con estímulos similares (Schofield y Georgeson, 2003; Manahilov, Calvert y Simpson, 2003). El utilizar estos cuatro píxeles por muestra, según Schofield y Georgeson (2003) y Manahilov et al. (2003), atenúa, además el problema de la no linealidad entre píxeles contiguos (Klein, Hu y Carney, 1996).

c) Otra fuente de artefactos de primer orden al utilizar ruido binario es el número de muestras de ruido por periodo de la función moduladora cuando ésta es un senoide. Según Schofield y Georgeson (1999), ha de haber como mínimo cuatro muestras por período para no introducir agrupamientos (clumping). En los experimentos realizados en este trabajo nuestros estímulos tuvieron cuatro o más muestras de ruido binario por período de la señal moduladora.

d) Según Scott-Samuel y Georgeson (1999), los productos de distorsión producidos por no linealidades en la transducción del estímulo incrementan con el cuadrado del contraste de la función portadora. En este trabajo se ha utilizado siempre un contraste para la función portadora de 0.35, lo que es considerado suficiente para evitar estos productos de distorsión.

2.3. Modelos psicofísicos de segundo orden

Los primeros modelos psicofísicos propuestos para explicar la percepción de la modulación en estímulos de segundo orden como los “beats” o pulsaciones, proponían la existencia de no linealidades anteriores a los filtros de primer orden (Burton, 1973; Henning et al., 1975; Nachmias y Rogowitz, 1983). Estas no linealidades introducían productos de distorsión, es decir, una modulación de luminancia de la misma frecuencia que la modulación del contraste. Estos productos de distorsión fueron observados en las células X del núcleo geniculado lateral del gato (Derrington, 1987) y también se han propuesto procesos de rectificación no lineal en los fotorreceptores (He y McLeod, 1998). Sin embargo, existen abundantes datos que rechazan la hipótesis de los productos de distorsión (Derrington y Badcock, 1986; Badcock y Derrington, 1989; Derrington y Henning, 1989; Cropper, 1998).

En la actualidad, el esquema de procesamiento más extendido para la percepción de la modulación en estímulos de segundo orden se compone de un filtro espacial, una no linealidad interpuesta, y un segundo filtro espacial. Este esquema básico ha recibido diferentes nombres: filtro-rectificación-filtro (FRF) (Dakin et al., 1999; para una revisión véase Wilson, 1999), modelo LNL (Lineal-No lineal-Lineal), “back pocket model” (Chubb y Landy, 1991; Landy y Oruc, 2002), o canales complejos o No-Fourier (Graham et al.,

1993). Básicamente, todos estos modelos suponen que el estímulo de segundo orden es analizado en una primera etapa por un conjunto de filtros (o canales) visuales que son sensibles a la función portadora. La salida de estos filtros de la primera etapa sufre un proceso no lineal de rectificación que puede ser completa (full-wave) o parcial (half-wave). La salida de la rectificación (envolvente), que lleva información acerca de la modulación, queda accesible a un conjunto de filtros (o canales) visuales en una segunda etapa que se encargan de recuperar la modulación, produciéndose así un proceso de demodulación del estímulo visual.

2.4. Características del mecanismo de segundo orden. El esquema FRF.

Para la percepción de la modulación del contraste en imágenes de contraste modulado se ha propuesto un mecanismo de segundo orden basado en el esquema básico FRF. Este esquema básico es el más extendido a la hora de explicar cómo el ser humano demodula la estructura de segundo orden y percibe la modulación del contraste en los estímulos de segundo orden (Chubb y Sperling, 1988; Sutter et al., 1989; Malik y Perona, 1990; Wilson et al., 1992; Chubb et al., 1994; Schofield, 2000; Chubb et al., 2001; Mussap, 2001; Landy y Oruc, 2002).

Dentro de este esquema FRF es necesario precisar las características de los filtros de la primera etapa; las características de la rectificación; las características de los filtros de la segunda etapa; y la forma en la que los filtros de la primera y segunda etapa se conectan entre sí.

Respecto a los filtros de la primera etapa, Dakin y Mareschal (2000) encuentran que su anchura de banda total en frecuencia a la mitad de la función es de 2 octavas y su anchura en orientación está entre 30° y 60°, características similares a los filtros de primer orden. Esto permite identificar los filtros de la primera etapa con los conocidos filtros lineales de luminancia propuestos para el análisis de los estímulos de primer orden. Por ello, en esta Tesis se hablará indistintamente de canales de primer orden o de la primera etapa. Respecto al procesamiento de los estímulos CM, los filtros de la primera etapa son selectivos a la frecuencia espacial de la función portadora.

Respecto a la rectificación, ésta se define en términos de contraste (véase Lu y Sperling, 2001, p. 2334), y es una transformación de los valores de la imagen a la salida de los filtros de la primera etapa. El primer problema que plantea la rectificación es si ésta es completa (full-wave) o parcial (de media onda, half-wave). Chubb y Sperling (1988) concluyen que la rectificación completa explica los resultados para la percepción del movimiento de segundo orden mejor que la rectificación parcial o que una compresión logarítmica de la luminancia (Burton, 1973). Solomon y Sperling (1994) encuentran que los sujetos son más eficientes extrayendo el movimiento de estímulos “full-wave” de segundo orden que de estímulos “half-wave”. Otros trabajos como los de Lu y Sperling (1996) muestran que la percepción de ilusiones visuales de segundo orden, en particular, imágenes de contraste modulado con moduladoras como las bandas de Mach, Chevreul o Craik-O’Brien-Cornsweet, apoyan la hipótesis de la rectificación completa frente a la parcial. El segundo problema que plantea la rectificación es la forma de la transformación de los valores de la imagen a la salida de los filtros de la primera etapa. La transformación puede ser lineal, compresiva, o expansiva (para una discusión acerca del tema véase Graham y Sutter, 1998). Graham y Sutter (1998) sugieren una rectificación expansiva para explicar la segregación de la textura. Sin embargo, la mayoría de los autores suponen que la rectificación es lineal (Chubb y Sperling, 1988; Sutter et al., 1995; Schofield, 2000; Mussap, 2001; Landy y Oruc, 2002). En consecuencia, en este trabajo se adoptará una rectificación completa con una forma lineal.

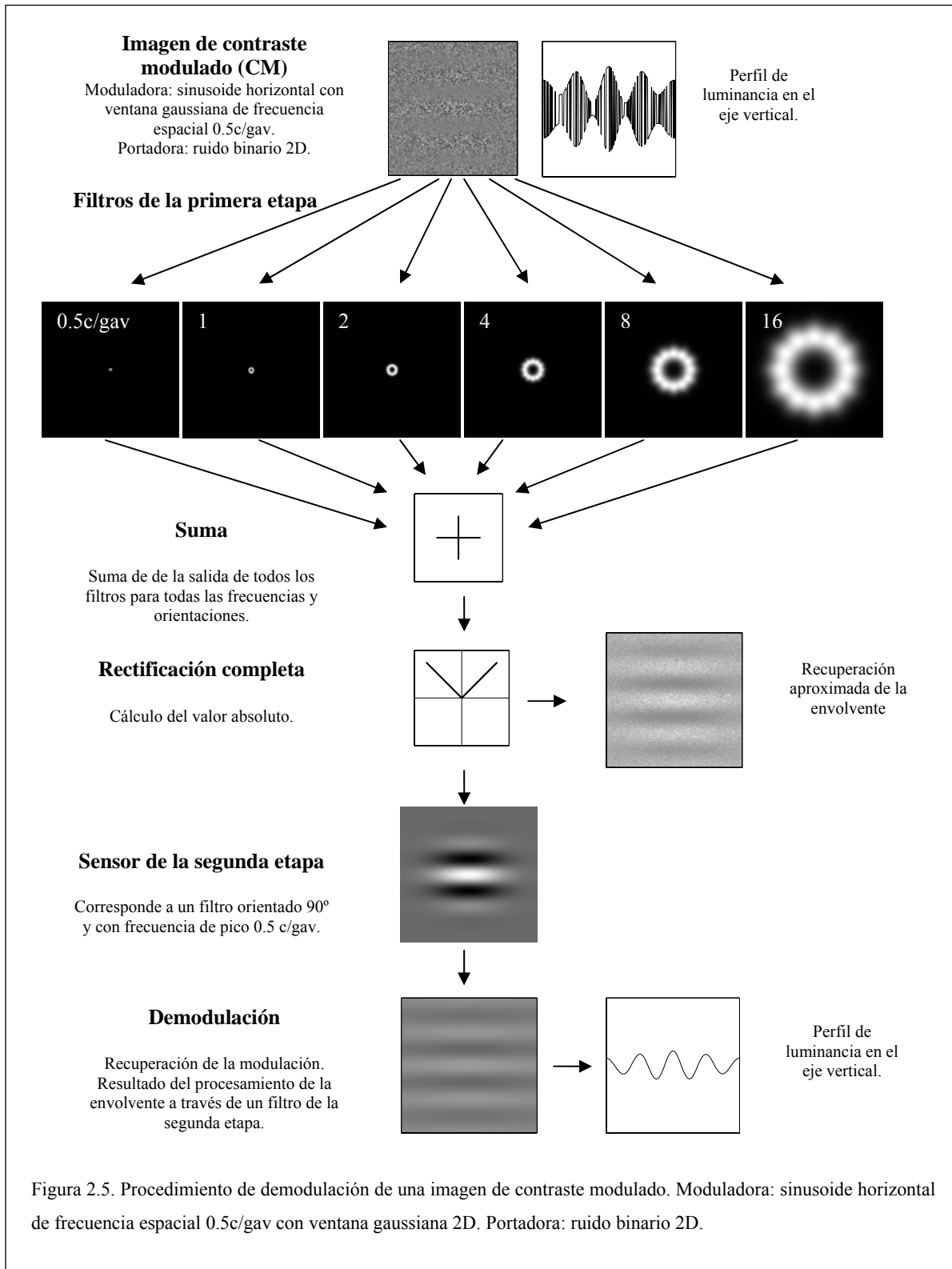
Respecto a los filtros de la segunda etapa, y para el procesamiento de imágenes CM, algunos autores suponen la existencia de filtros independientes selectivos en frecuencia y orientación que operan sobre la envolvente igual que los filtros de primer orden operan sobre las imágenes de luminancia (Mareschal y Baker, 1999; Hutchinson y Ledgeway, 2004). Estos filtros son llamados, también con terminología equívoca, filtros de segundo orden (Landy y Graham, 2003).

Respecto a las conexiones particulares entre los filtros de la primera etapa y los de la segunda existen varias posibilidades (Mussap, 2001). Las dos más comunes en la literatura son: a) las salidas de los filtros de la primera fase son sumadas antes de la rectificación y sobre esa suma actúan los filtros de la segunda etapa (modelo de suma anterior), y b) la

salida de cada filtro de la primera etapa es rectificado independientemente del resto y luego las salidas rectificadas son sumadas antes de ser procesadas por los filtros de la segunda etapa (modelo de suma posterior). Existen evidencias experimentales y razones teóricas a favor de uno u otro esquema. Mussap (2001) encuentra que el modelo de conexiones que mejor se ajusta a sus resultados con estímulos de contraste modulado es el modelo de suma posterior. Sin embargo, Dakin et al. (1999) comparan estos dos modelos, encontrando que aunque ninguno explica correctamente sus resultados, el modelo de suma posterior da lugar a predicciones que en algunos casos son contrarias a los resultados psicofísicos. En cambio, Schofield (2000) compara estos dos modelos analizando la información que extrae cada uno de ellos de imágenes naturales, y en sus resultados no encuentra diferencias. En general, el modelo utilizado para explicar la segregación de la textura (por ejemplo con estímulos OM) se basa en el modelo de suma posterior (Wilson et al., 1992; Dakin y Mareschal, 2000; Landy y Oruc, 2002). Sin embargo, para estudiar la percepción de la modulación en estímulos CM es preferible utilizar el modelo de suma anterior ya que éste requiere menos recursos que el modelo de suma posterior que requeriría una gran cantidad de canales (Dakin y Mareschal, 2000). Por lo tanto, el supuesto de suma anterior será el adoptado en esta Tesis.

En síntesis, en esta Tesis se adoptará como *modelo del mecanismo de demodulación visual del contraste un esquema FRF con el modelo de suma anterior, una rectificación completa con forma lineal y unos filtros para la primera y segunda etapa que se suponen selectivos en frecuencia y orientación*. En la Figura 2.5 se muestra el funcionamiento del esquema FRF propuesto, aplicado a una imagen de contraste modulado de modo sinusoidal. Para los filtros de la primera etapa se ha elegido la FTM más utilizada en los modelos de segundo orden. En particular se ha utilizado el módulo de la transformada de Fourier de una función de Gabor. Su forma en el dominio de la frecuencia corresponde a una función simétrica en escala lineal, y la forma elegida en orientación también es simétrica (en escala lineal). Por claridad se han elegido solamente seis frecuencias centrales (o frecuencias de pico) para los filtros (desde 0.5 c/gav hasta 16 c/gav en pasos de una octava) y seis orientaciones diferentes (desde 0° hasta 150° en pasos de 30°). La anchura de banda a la mitad de la función de los filtros es de una octava con independencia

de la frecuencia de pico. La anchura de banda total a la mitad de la función en orientación es igual a 30° como proponen Dakin y Mareschal (2000). En la segunda etapa, sólo se ha utilizado un filtro simétrico (en escala lineal) orientado 90° y centrado en la frecuencia 0.5 c/gav, que es representado uno de sus sensores. Como se puede ver en la Figura 2.5, la salida de la rectificación cuando la función portadora es ruido binario 2D es una imagen de luminancia para los filtros de la segunda etapa. Nótese que en este caso particular la recuperación de la envolvente es prácticamente perfecta, aunque esta recuperación mejoraría aumentando el número de filtros de la primera etapa. Obsérvese que la salida del filtro de la segunda etapa (demodulación) se corresponde con la modulación del contraste percibida en la imagen CM.



Capítulo 3

OBJETIVOS

El objetivo general de esta Tesis es la *caracterización de las propiedades de los filtros del esquema FRF que permiten al ser humano percibir la modulación en amplitud o del contraste de los estímulos de segundo orden*. El esquema FRF propuesto para los mecanismos correspondientes está lejos de ser completo, y no sólo en lo que respecta al mapa de conexiones entre los filtros de la primera y segunda etapa. En efecto, ese esquema supone sin más linealidad. Hasta donde llega mi conocimiento, no se ha proporcionado hasta ahora ninguna evidencia a favor de este supuesto utilizando estímulos CM y dentro de un rango amplio de frecuencias espaciales de modulación. Por otro lado, la caracterización 1D y 2D de los filtros de primer orden (que supondremos son idénticos a los filtros de la primera etapa) es conocida. Sin embargo su caracterización es necesaria por una doble razón: obtener datos para la caracterización de un modelo de segundo orden propio y calibrar el modelo formal de enmascaramiento con estímulos de primer orden para los que existen abundantes resultados experimentales con el fin de generalizar este modelo al estudio de los filtros de la segunda etapa. La características de estos últimos (forma y relación entre anchura de banda del filtro y su frecuencia de pico), más allá de ser conceptualizados como filtros paso-banda orientados, están sin determinar. La consecuencia es que los modelos de demodulación propuestos están incompletos para una implementación algorítmica que capture de modo realista las propiedades del procesamiento del mecanismo de segundo orden con los que explicar resultados experimentales y fenómenos de la percepción visual de la forma. La complejidad de la metodología utilizada, la duración de los experimentos, la complejidad del análisis de los resultados y los problemas formales implicados han aconsejado abordar sólo la caracterización 1D de los filtros del mecanismo de segundo orden, dejando abierto para el futuro la caracterización 2D. Los objetivos parciales para lograr el objetivo general se exponen a continuación.

3.1. Pruebas de linealidad de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden.

La percepción de la modulación del contraste en estímulos CM necesita un mecanismo visual diferente al que propone la teoría multicanal para estímulos de primer orden, ya que los canales de primer orden en ausencia de productos de distorsión no pueden detectar la modulación por sí solos. Para detectar la modulación de estímulos CM se ha propuesto, como se ha dicho, un mecanismo de segundo orden con un esquema (FRF) basado en un filtrado inicial (filtros de la primera etapa) similar al propuesto por la teoría multicanal, seguido de un proceso no lineal de rectificación completa, tras el cual se estima la envolvente del estímulo que será analizada posteriormente por otro banco de filtros (filtros de la segunda etapa) que extraen la modulación (demodulación). Hasta ahora no se ha mostrado evidencia empírica de que los filtros de la segunda etapa implicados directamente en la demodulación del contraste se comporten como sistemas lineales. Por ello, *el primer objetivo de esta Tesis es comprobar la linealidad de los filtros de la segunda etapa del esquema FRF*. Esta prueba de linealidad, además de tener interés en sí, es necesaria ya que el modelo de enmascaramiento utilizado para caracterizar estos filtros requiere que, como los filtros de la primera etapa, también se comporten de modo lineal (véanse los Capítulos 4 y 8).

Quizá uno de los trabajos de mayor trascendencia en psicofísica visual es el de Campbell y Robson (1968), donde se confirma que el SVH, por lo menos en el umbral se comporta linealmente. En uno de los experimentos donde se muestra la linealidad del SVH, se comparaba la sensibilidad visual entre modulaciones sinusoidales y modulaciones en forma de onda cuadrada de la luminancia (estímulos de primer orden). En esta Tesis, para comprobar la linealidad de los filtros de la segunda etapa se ha realizado un experimento similar al de Campbell y Robson pero con estímulos de contraste modulado (estímulos de segundo orden), a la vez que se replica el mismo experimento con estímulos de primer orden para validar el procedimiento. A partir de estos resultados experimentales se obtendrán la Función de Sensibilidad al Contraste unidimensional (*FSC-ID*, véase el Capítulo 7) para estímulos de primer orden, y la Función de Sensibilidad a la Modulación

del Contraste unidimensional (FSMC-1D, véase el Capítulo 8) para estímulos de segundo orden, necesarias para el modelo de enmascaramiento (véase el Capítulo 4).

3.2. Caracterización anisotrópica de los filtros de primer orden mediante el modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas

Existen multitud de evidencias experimentales a favor de la teoría multicanal de la visión espacial humana. Esta teoría establece que el SVH desde un punto de vista psicofísico está compuesto por un conjunto de filtros (o canales) lineales independientes que trabajan en paralelo, cada uno de ellos sintonizado a un rango de frecuencias espaciales y orientaciones. (Campbell y Robson, 1968; Graham y Nachmias, 1971; Daugman, 1984; véase en Graham, 1989 la revisión más completa del asunto). Estas evidencias han sido obtenidas básicamente mediante tres paradigmas experimentales (suma subumbral, adaptación selectiva y enmascaramiento), proporcionando cada uno de ellos resultados diferentes acerca de la anchura y forma de los filtros de primer orden (Bradick, Campbell y Atkinson, 1978; Kelly y Burbeck, 1984). A pesar de su caracterización 1D (véase Graham, 1989) y de su caracterización 2D (Daugman, 1984; Harvey y van Doan, 1990; Anderson, Burr y Morrone, 1991), tres razones (dos de ellas ya señaladas) recomiendan su caracterización en esta Tesis: la necesidad de disponer de datos experimentales para la construcción de un modelo computacional propio (véase Capítulo 9), la validación del modelo de enmascaramiento utilizado para la caracterización de los filtros de primer orden y la elección razonada del tipo de ruido máscara que se utilizará para estudiar los filtros de la segunda etapa.

Por ello, *el segundo objetivo de esta Tesis es caracterizar anisotrópicamente los filtros de primer orden*, que suponemos son los mismos filtros de la primera etapa del mecanismo de segundo orden (como se puede deducir de los datos de Dakin y Mareschal, 2000). Para la consecución de este objetivo se ha empleado el paradigma experimental de enmascaramiento con el fin de decidir entre dos formas (simétrica o asimétrica) para las funciones de transferencia de modulación anisotrópicas (FTM-1D) de los filtros, y estimar las anchuras de banda de estas FTM-1D. Se ha elegido el paradigma de enmascaramiento porque, además de ser ampliamente utilizado en psicofísica visual y auditiva, tiene como

base un modelo formal de enmascaramiento (basado en la existencia de bandas críticas) explícito que permite una fácil interpretación de los resultados experimentales y porque su extensión al estudio de los mecanismos de segundo orden es directa (como se verá en los Capítulos 4 y 8). Pero necesitamos estar seguros del funcionamiento correcto del modelo y conocer su comportamiento con distintos tipos de ruido para posteriormente generalizarlo a la caracterización de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden. Por lo tanto, *el tercer objetivo de esta Tesis es validar el modelo de enmascaramiento*. Además, necesitamos saber cuáles son las predicciones del modelo para diferentes tipos de ruidos máscara y cómo con cada tipo se solventa el problema del efecto de off-frequency looking (efecto que se tratará con más detalle en el Capítulo 4). Por ello se ha realizado un estudio intensivo en el que se han utilizado diferentes tipos de ruido blanco 1D filtrado (paso-todo, paso-alto, paso-bajo, paso-todo con muesca espectral, paso-banda y paso-banda doble).

3.3. Caracterización anisotrópica de los filtros de la segunda etapa del mecanismo espacial de segundo orden.

Hasta la fecha, los filtros de la segunda etapa no han sido caracterizados psicofísicamente utilizando estímulos CM estáticos y mediante el paradigma de enmascaramiento basado en bandas críticas. Suponiendo el esquema FRF para la percepción de la modulación del contraste en estímulos de segundo orden, *el cuarto objetivo de esta Tesis es caracterizar anisotrópicamente los filtros de la segunda etapa del esquema FRF* y, en particular, decidir entre dos formas (simétrica o asimétrica) para las FTM-1D de los filtros de la segunda etapa, así como estimar sus anchuras de banda. Para ello se ha utilizado el paradigma experimental de enmascaramiento y el mismo modelo de enmascaramiento validado en el tercer objetivo.

3.4. Propuesta de un modelo de segundo orden y explicación de resultados experimentales y fenómenos de la percepción de la forma.

Algunos de los resultados experimentales más relevantes obtenidos en psicofísica visual con estímulos CM muestran que la sensibilidad a la modulación del contraste aumenta con

la distancia espectral entre la frecuencia de modulación y la frecuencia de la portadora (Jamar y Koenderink, 1985; Sutter et al., 1995; Dakin y Mareschal, 2000). Otros resultados muestran que cuando la diferencia en frecuencia (entre la función moduladora y la portadora) es grande, la sensibilidad a la modulación es independiente de la orientación de la función portadora respecto a la función moduladora (Dakin y Mareschal, 2000; Mussap, 2001); por el contrario, si la diferencia es pequeña, la sensibilidad depende de la orientación de la función portadora, siendo mayor cuando la orientación de la función portadora es ortogonal a la orientación de la función moduladora (Dakin y Mareschal, 2000).

Por otra parte, existen algunos fenómenos visuales como las ilusiones visuales geométricas o el agrupamiento perceptivo que habitualmente han sido explicadas por el contenido de bajas frecuencias espaciales presentes en las imágenes que muestran estos fenómenos (véase el trabajo clásico de Ginsburg, 1978). Sin embargo, existen evidencias que muestran que estos fenómenos se siguen produciendo aún en ausencia de bajas frecuencias espaciales (Skottun, 2000) o en estímulos con muy baja energía relativa en las bajas frecuencias espaciales (Jáñez, 1984; Carlson, Moeller y Anderson, 1984), por lo que los filtros de primer orden selectivos a las bajas frecuencias no informarían de estos fenómenos.

Establecida la propiedad de linealidad y caracterizados anisotrópicamente los filtros del esquema FRF, *el quinto objetivo de esta Tesis es proponer un modelo isotrópico computable para el mecanismo de segundo orden*, con el fin de explicar cualitativamente algunos resultados experimentales con estímulos de segundo orden y fenómenos de la percepción visual de la forma como los citados, no explicados hasta ahora.

Capítulo 4

PARADIGMA EXPERIMENTAL DE ENMASCARAMIENTO CON RUIDO VISUAL

4.1. El paradigma experimental de enmascaramiento

El efecto de enmascaramiento consiste en la reducción de la sensibilidad (i.e. el incremento del umbral absoluto) a un estímulo (señal), debido a la presentación previa, simultánea o posterior de otro estímulo (máscara). El paradigma de enmascaramiento utiliza ese efecto para derivar las características de los hipotéticos canales que, se supone, componen la arquitectura funcional psicofísica de la visión espacial humana. El procedimiento utilizado en esta Tesis consiste en medir el umbral de detección de una señal inserta espacialmente en ruido visual y se basa en el supuesto de que si el ruido hace que la señal sea menos detectable (es decir, si eleva su umbral de detección) entonces señal y máscara son procesados por el mismo mecanismo espectral (canal); en caso contrario, son procesados por mecanismos diferentes. Pero ese simple supuesto no basta para justificar la interpretación de que la forma de los resultados empíricos es un reflejo fiel de la forma de los canales que operan en el efecto de enmascaramiento, y, por extensión en la visión espacial humana, sino que es necesario tener un modelo de enmascaramiento, con un modelo de procesamiento y un modelo de detección.

4.2. Modelo de enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas

Dentro del paradigma experimental de enmascaramiento con ruido visual, se ha utilizado un modelo de enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas (*critical-band-masking paradigm*) para estimar la forma y la anchura de banda de las funciones de transferencia de modulación (FTM) de los hipotéticos canales psicofísicos visuales. Este modelo de bandas críticas, es una extensión a la visión del modelo de enmascaramiento propuesto inicialmente por Fletcher (1940) en audición y posteriormente formalizado por Patterson (1974) para estimar la forma de los canales auditivos. El postulado fundamental del modelo supone que la potencia de la señal enmascarada en el umbral es proporcional a

la potencia del ruido máscara que pasa por el canal responsable de la detección. Es decir, en el umbral, la razón entre la potencia de la señal y la potencia del ruido a la salida del canal responsable de la detección es igual a un valor constante. Por lo tanto el umbral absoluto de esa señal inserta en ruido es una medida indirecta del área de solapamiento entre el ruido y el canal y, en consecuencia, es posible inferir la forma y las características espectrales de las FTM de los canales a partir de la medida de esos umbrales (Patterson, 1974, 1976; Henning, Hertz y Hinton, 1981; Pelli, 1981; Solomon y Pelli, 1994; Losada y Mullen, 1995; Solomon, 2000; Hutchinson, y Ledgeway, 2004).

Dos vías alternativas se han seguido para inferir las FTM de los canales, conocidos los umbrales de detección medidos mediante el paradigma de enmascaramiento: a) derivar numéricamente el umbral empírico con respecto al parámetro relevante del ruido y comparar el resultado con alguna función plausible (Patterson, 1974 y 1976; Solomon y Pelli, 1994); y b) adoptar un modelo de procesamiento junto con un modelo de detección, predecir el umbral de detección a partir de un modelo de enmascaramiento y compararlo con el obtenido empíricamente (Solomon, 2000). En este trabajo se sigue la segunda vía, por lo que es necesario especificar los postulados del modelo de enmascaramiento. A partir de éstos se llega a una ecuación general de enmascaramiento similar a la utilizada anteriormente por Solomon (2000). Pero las predicciones para ambas vías dependen del modelo de detección supuesto. Habitualmente se ha supuesto, que la detección viene dada por el canal centrado en la frecuencia espacial de la señal (modelo de canal fijo). Sin embargo, puesto que múltiples canales procesan la señal, es posible que la detección venga dada por un canal no centrado en la frecuencia espacial de la señal (modelo de canal variable), efecto denominado *off-frequency looking* (Pelli, 1981; Henning et al., 1981; Perkins y Landy, 1991; Losada y Mullen, 1995; Solomon, 2000; Majaj, Pelli, Kurshan y Palomares, 2002), análogo al fenómeno de *off-frequency listening* en audición (Patterson, 1976; Patterson y Nimmo-Smith, 1980) o *estrategia de escucha fuera de la frecuencia* (López-Bascuas, 1999). Cuando se trate de los modelos de detección, se describirá con más detalle el problema planteado por el efecto de *off-frequency looking*.

4.2.1. Postulados del modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas

Sea el estímulo una imagen L compuesta por una señal f , $-1 \leq f(x) \leq 1$, inserta en ruido visual 1D r , $-1 \leq r(x) \leq 1$,

$$L(x, y) = L_0(1 + m_f f(x) + m_r r(x)), \quad 0 \leq m_f \leq 1, \quad 0 \leq m_r \leq 1, \quad 0 \leq (m_f + m_r) \leq 1$$

donde L_0 es la luminancia media (cd/m^2), m_f es el contraste de la señal f (enrejado sinusoidal de frecuencia u_0) y m_r el contraste del ruido máscara r . [Obsérvese que en adelante la letra r sola o acompañada de un subíndice que indica el tipo de ruido, representa la función del ruido en el dominio espacial]. Nótese que aunque el estímulo es una imagen, su perfil de luminancia varía a lo largo de la variable x y es idéntico a lo largo de la variable y . Como se ha indicado en el apartado 2.4, cuando el estímulo es una imagen CM y su función portadora es ruido binario 2D, la salida de la rectificación es ya una imagen de luminancia para los filtros de la segunda etapa. Por ello en el modelo de enmascaramiento que sigue se hablará sólo de estímulos de luminancia.

El modelo de enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas consta de los siguientes postulados:

Postulado 1. La visión espacial humana, desde un punto de vista psicofísico, y en lo que respecta al procesamiento de los estímulos de primer orden, está compuesto por un conjunto de canales (o bandas críticas) que son mecanismos separados e independientes, operando linealmente y en paralelo, cuya FTM-1D para un canal cualquiera i se simboliza por $|H(u; u_i)|$, donde u_i es la frecuencia de pico o de sintonía del canal.

Respecto al procesamiento de los estímulos de segundo orden (en particular estímulos de contraste modulado), el SVH, desde un punto de vista psicofísico, está compuesto por dos conjuntos independientes de canales (filtros de la primera etapa y filtros de la segunda etapa) con una rectificación interpuesta. Los canales de cada conjunto son mecanismos separados e independientes que operan linealmente y en paralelo.

Postulado 2. El estímulo L es procesado por todos los canales, y la detección de la señal f inserta en un ruido r se produce por un único canal k .

Postulado 3. En el umbral de detección de la señal inserta en ruido, la razón entre la potencia de la señal y la potencia del ruido (en adelante, razón señal/ruido) a la salida del

canal k es igual a un valor constante e independiente de la composición espectral de la señal y del ruido.

4.2.2. Ecuación general del modelo de enmascaramiento

Teorema

Sea una señal f (enrejado sinusoidal con frecuencia espacial u_0) inserta en ruido visual 1D de nivel o densidad espectral de potencia N_0 (véase el Apéndice A.1.4). El modelo de enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas establece que el umbral de detección al cuadrado de la señal inserta en ruido, $m_{f_0}^2$, es

$$m_{f_0}^2(u_0, \xi, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4}{s} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 n(u; \xi) du}{|H(u_0; u_k)|^2}, \quad (4.1)$$

donde $m_0^2(u_k)$ es el umbral de detección al cuadrado de una señal con frecuencia u_k en ausencia de ruido visual externo (valor que se obtiene a partir de la *FSC-ID* de la persona); $n(u; \xi)$ es el espectro de potencia (espectro uniforme dentro de una banda de frecuencias espaciales, véase el Apéndice 3) del ruido máscara 1D con nivel N_0 donde u es la variable frecuencia espacial; ξ es una variable nominal que identifica al tipo de ruido (paso-todo, paso-bajo, paso-alto, paso-banda, con muesca espectral o paso-banda doble) (esta variable nominal se ha utilizado para dar generalidad al modelo y desaparece cuando el ruido está especificado); y $|H(u; u_k)|$, la FTM-1D del canal k que detecta la señal inserta en ruido cuya frecuencia de pico es u_k . El parámetro s se puede considerar como una medida de la sensibilidad del sistema, de tal modo que cuando s es un valor pequeño, el sistema tiene poca sensibilidad y viceversa.

Demostración

Según el Postulado 1, la visión espacial humana está compuesta por un conjunto de canales cuya FTM-1D para el canal i es $|H(u; u_i)|$ (que se supone función real con simetría par). Según el Postulado 2, estos canales analizan el estímulo L (señal inserta en ruido visual) y detectan la señal a través de un único canal k . Según el Postulado 3, cuando la señal f

(enrejado sinusoidal de frecuencia u_0) inserta en un ruido r alcanza el umbral ($m_{f_0}(u_0)$), entonces a la salida del canal k , la razón entre la potencia de la señal y la potencia del ruido es igual a un valor constante. La potencia de la señal o del ruido que pasa por el canal k se obtiene integrando el producto del espectro de potencia (EP) de la señal o del ruido por la FTM-1D del canal al cuadrado. En lo que sigue se calcula la potencia de la señal en el umbral y la potencia del ruido que pasa por un canal.

a) *Potencia de la señal en el umbral que pasa por el canal k*

La potencia de la señal en el umbral que pasa por el canal k es

$$P_f(u_0, u_k, m_{f_0}) = \int_{-\infty}^{+\infty} EP_f(u) \times |H(u; u_k)|^2 du . \quad (4.2)$$

El espectro de potencia de la señal f (enrejado sinusoidal con frecuencia espacial u_0 y contraste m_{f_0} , es decir, $f(x) = m_{f_0} \cos(2\pi u_0 x + \theta)$), es el siguiente (Papoulis, 1962, pp. 251; Hartmann, 1998, pp. 341).

$$EP_f(u) = \frac{m_{f_0}^2(-u_0)}{4} \delta(u - u_0) + \frac{m_{f_0}^2(u_0)}{4} \delta(u + u_0) . \quad (4.3)$$

[Por simplicidad se ha eliminado la ventana gaussiana utilizada en los experimentos (véase la justificación formal de esta decisión en el Apéndice A.4.3)]

Por lo tanto, la potencia de la señal que pasa por el canal k se calcula del siguiente modo

$$P_f(u_0, u_k, m_{f_0}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{m_{f_0}^2(-u_0)}{4} \delta(u - u_0) + \frac{m_{f_0}^2(u_0)}{4} \delta(u + u_0) \right] \times |H(u; u_k)|^2 du . \quad (4.4)$$

Evalutando la integral, tenemos

$$P_f(u_0, u_k, m_{f_0}) = \frac{m_{f_0}^2(-u_0)}{4} |H(-u_0; -u_k)|^2 + \frac{m_{f_0}^2(u_0)}{4} |H(u_0; u_k)|^2 . \quad (4.5)$$

Como el filtro $|H(u; u_i)|$ es una función real con simetría par, entonces

$$|H(-u_0; -u_k)|^2 = |H(u_0; u_k)|^2 .$$

Por último, la potencia de la señal en el umbral que pasa por el canal k es

$$P_f(u_0, u_k, m_{f_0}) = \frac{m_{f_0}^2(u_0)}{2} |H(u_0; u_k)|^2 . \quad (4.6)$$

b) *Potencia del ruido que pasa por el canal k*

Si el ruido máscara r tiene el espectro de potencia $n(u; \xi)$ uniforme con un determinado nivel N_0 , entonces la potencia del ruido que pasa por el canal k se calcula del siguiente modo (Patterson, 1974)

$$P_r(u_k, \xi, N_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 n(u; \xi) du = 2 \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 n(u; \xi) du. \quad (4.7)$$

Si se supone que cada canal i posee un ruido interno $N_i(u_i)$ (Legge, Kersten y Burgess, 1987; Solomon y Pelli, 1994; Losada y Mullen, 1995; Blackwell, 1998; Solomon, 2000), entonces el ruido interno, $N_i(u_k)$, del canal k se suma a la potencia del ruido físico que pasa por ese mismo canal. Es decir,

$$P_r(u_k, \xi, N_0) = N_i(u_k) + 2 \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 n(u; \xi) du. \quad (4.8)$$

Tal y como establece el Postulado 3, en el umbral, la razón R entre la potencia de la señal y la potencia del ruido a la salida del canal k que detecta la señal inserta en ruido es igual a un valor constante ($1/s$) (Patterson, 1974, 1976; Patterson y Nimmo-Smith, 1980; Henning et al., 1981; Losada y Mullen, 1995; Solomon, 2000). Así pues, en el umbral de detección m_{f0} , la razón señal/ruido a la salida del canal u_k para un enrejado sinusoidal de frecuencia espacial u_0 inserto en un tipo de ruido ξ con un nivel N_0 , $R(u_0, u_k, m_{f0}, \xi, N_0)$, es

$$R(u_0, u_k, m_{f0}, \xi, N_0) = \frac{P_f(u_0, u_k, m_{s0})}{P_r(u_k, \xi, N_0)}. \quad (4.9)$$

De acuerdo con el Postulado 3, esta razón es igual a un valor constante ($1/s$)

$$R(u_0, u_k, m_{f0}, \xi, N_0) = \frac{1}{s}, \quad (4.10)$$

donde el parámetro s es la sensibilidad del sistema. Desarrollando la razón $R(u_0, u_k, m_{f0}, \xi, N_0)$, se obtiene

$$\frac{\frac{m_{f0}^2(u_0)}{2} |H(u_0; u_k)|^2}{N_i(u_k) + 2 \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 n(u; \xi) du} = \frac{1}{s}.$$

Despejando el valor del umbral al cuadrado $m_{f_0}^2(u_0)$, se obtiene la siguiente expresión

$$m_{f_0}^2(u_0, \xi, N_0) = \frac{2N_i(u_k) + 4 \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 n(u; \xi) du}{s |H(u_0; u_k)|^2}. \quad (4.11)$$

Ahora bien, se desconoce el valor del ruido interno $N_i(u_k)$; pero si forzamos a que la frecuencia espacial de pico de la FTM-1D del canal coincida con la frecuencia espacial para detectar un enrejado de frecuencia u_0 ($u_k = u_0$) (Solomon, 2000) y suponemos que no hay ruido visual externo, entonces

$$m_0^2(u_0) = \frac{2N_i(u_0)}{s |H(u_0; u_0)|^2}, \quad (4.12)$$

donde el valor de $m_0^2(u_0)$ corresponde al valor del umbral de contraste al cuadrado para la detección de un enrejado sinusoidal de frecuencia u_0 sin ruido máscara externo. Siendo

$|H(u_0; u_0)|^2 = 1$, entonces el ruido interno de un canal con frecuencia de pico u_0 es

$$N_i(u_0) = \frac{sm_0^2(u_0)}{2},$$

por lo tanto, el ruido interno N_i para el canal k es

$$N_i(u_k) = \frac{sm_0^2(u_k)}{2}. \quad (4.13)$$

Por último, sustituyendo $N_i(u_k)$ en la ecuación (4.11) se llega a la expresión general del modelo de enmascaramiento (ecuación (4.1)).

4.3. Modelo de Procesamiento

Para poder aplicar el modelo de enmascaramiento es necesario asumir una determinada arquitectura funcional del SVH, es decir, un modelo de procesamiento. Este modelo queda completamente caracterizado cuando se conoce: A) el ruido interno de cada canal; B) la forma de la FTM-1D de los canales psicofísicos; y C) la forma funcional de la relación entre la anchura de banda de la FTM-1D de los canales y la frecuencia de pico de ésta.

A) Ruido interno del canal

Uno de los componentes del modelo de procesamiento es el ruido interno N_i que posee cada canal. Según el modelo de enmascaramiento, para obtener el valor del ruido interno de un canal k se necesita conocer el valor del umbral de contraste al cuadrado ($m_0^2(u_k)$) para la detección de un enrejado sinusoidal de frecuencia espacial igual a la frecuencia de pico u_k del canal en ausencia de ruido máscara externo (véase la ecuación (4.13)). Para ello, cuando se quiere conocer el ruido interno de un filtro de primer orden, se utiliza la siguiente función

$$m_0^2(u) = \left[\frac{1}{SC(u)} \right]^2, \quad (4.14)$$

donde SC es la sensibilidad al contraste para la detección de un enrejado sinusoidal, que se define como la inversa del umbral de contraste ($1/m_0(u)$). Sin embargo, cuando se quiere conocer el ruido interno de un filtro de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden, es necesario conocer la sensibilidad a la modulación del contraste (SMC) o sensibilidad a la profundidad de modulación para la detección de un enrejado sinusoidal modulador. En esta Tesis, para estimar el ruido interno de los filtros de primer orden se ha adoptado una forma funcional para la función de sensibilidad al contraste unidimensional ($FSC-ID$) y para los filtros de la segunda etapa se ha adoptado por una forma diferente para la función de sensibilidad a la modulación del contraste unidimensional ($FSMC-ID$). Las formas funcionales para la sensibilidad son:

1) Primer orden: $FSC-ID$

La función que mejor se ha ajustado a la sensibilidad al contraste de enrejados sinusoidales es

$$SC(u) = Au \exp[-au], \quad (4.15)$$

donde u es la frecuencia espacial de la función sinusoidal moduladora de la luminancia, y $1/a$ es la frecuencia espacial donde la $FSC-ID$ tiene el máximo. La ecuación (4.15) es una variante de la propuesta por Kelly (1975, 1977) (véase también Wilson y Giese, 1977, eq. 14; García-Pérez y Sierra-Vázquez, 1995, eq. 13).

2) Segundo orden: *FSMC-1D*

La expresión que mejor se ha ajustado a la sensibilidad a la modulación del contraste es la función lognormal

$$SMC(u_m) = A \exp\left[-\frac{\ln^2(u_m / u_{\max})}{2a^2}\right], \quad (4.16)$$

donde u_m es la frecuencia espacial de la modulación sinusoidal del contraste de la función portadora y u_{\max} es la frecuencia espacial de modulación donde la *FSMC-1D* tiene el máximo.

B) Función de transferencia de modulación unidimensional (FTM-1D) de los canales psicofísicos

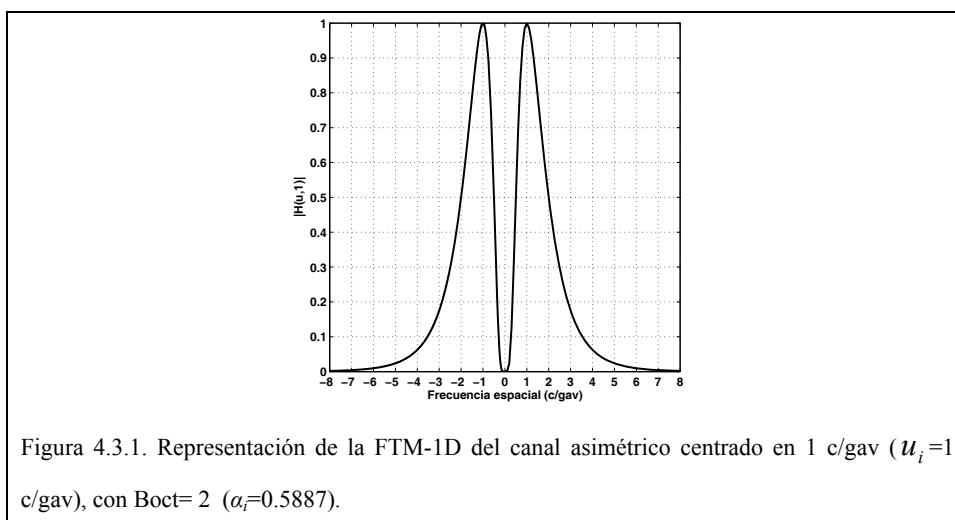
Para caracterizar los canales psicofísicos de los mecanismos de primer y segundo orden se han utilizado dos formas alternativas para la FTM-1D:

a) Función lognormal 1D (Morrone y Burr, 1988; Solomon, 2000), que es una función *asimétrica* respecto a la frecuencia de pico del canal (cuando se representa en escala lineal) (véase la Figura 4.3.1), y que se define así

$$|H(u; u_i)| = \begin{cases} \exp\left[-\frac{\ln^2(|u|/u_i)}{2\alpha_i^2}\right] & \Leftrightarrow u \neq 0 \\ 0 & \Leftrightarrow u = 0, \end{cases} \quad (4.17)$$

donde u_i , en c/gav, $u_i > 0$ es la frecuencia de pico del canal (valor en el que la función tiene el máximo) y α_i , en c/gav, es un parámetro que está relacionado con la anchura del canal. Su anchura de banda total a la mitad de la función, Boct, en octavas, es

$$\text{Boct} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\ln(2)}} \times \alpha_i. \quad (4.18)$$

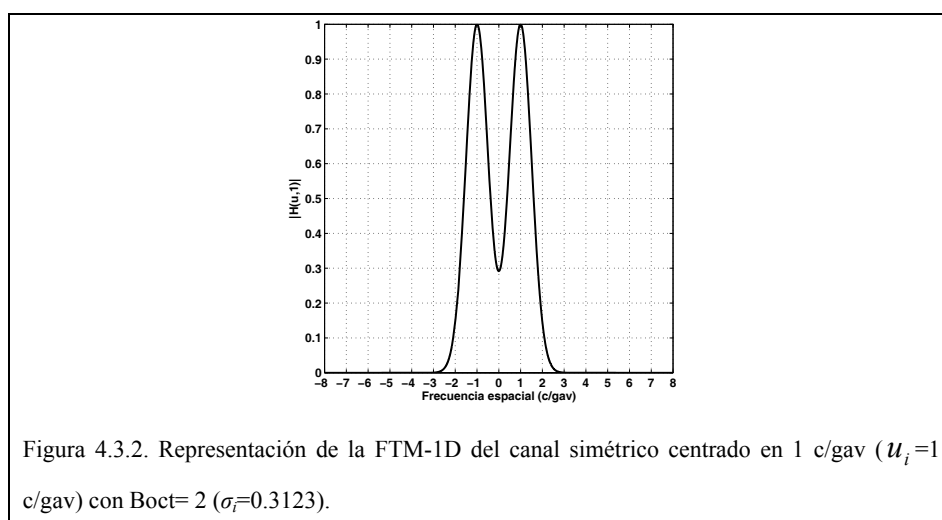


b) Módulo de la transformada de Fourier de una función de Gabor 1D (García-Pérez y Sierra-Vázquez, 1996), que es una función *simétrica* respecto a la frecuencia de pico del canal (cuando se representa en escala lineal) (véase la Figura 4.3.2), y que se define así

$$|H(u;u_i)| = \exp\left[-2\pi^2\sigma_i^2(u-u_i)^2\right] + \exp\left[-2\pi^2\sigma_i^2(u+u_i)^2\right], \quad (4.19)$$

donde u_i , en c/gav, $u_i > 0$ es la frecuencia de pico del canal y el parámetro σ_i , en c/gav, está relacionado con la anchura del canal. Su anchura de banda total a la mitad de la función, Boct, en octavas, es

$$\text{Boct} = \log_2 \left[\frac{u_i \pi \sigma_i \sqrt{2} + \sqrt{\ln(2)}}{u_i \pi \sigma_i \sqrt{2} - \sqrt{\ln(2)}} \right]. \quad (4.20)$$



C) Anchura de banda de los canales psicofísicos

Estudios previos han mostrado diferentes formas para la relación funcional entre las anchuras de banda en octavas de las FTM de los canales y su frecuencia de pico. Losada y Mullen, (1995, fig. 4) comparando los resultados de enmascaramiento con ruido $1/f$ y con ruido blanco concluyen que la anchura de banda en octavas de los canales psicofísicos es constante. Sin embargo, Wilson, McFarlane y Phillips (1983, fig. 11) mediante enmascaramiento oblicuo con enrejados sinusoidales muestran que la anchura de banda en octavas de los canales decrece con el aumento de la frecuencia de pico de éstos. Un resultado análogo fue obtenido por Solomon (2000, fig. 6) mediante enmascaramiento con ruido blanco filtrado paso alto y paso bajo. También, De Valois, Albrecht y Thorell (1982, fig. 7), encuentran que las anchuras de banda de las *FSC* de las células simples y complejas de la corteza estriada del macaco decrecen con el aumento de la frecuencia de pico de éstas. Teniendo en cuenta estos resultados previos, en esta Tesis se ha adoptado una posición neutra y se ha propuesto una expresión formal plausible que contempla los dos tipos de relación (constante o decreciente). Para la elección de la función también se ha considerado que la anchura de banda de los canales psicofísicos expresada en octavas deberá ser siempre mayor que cero.

La expresión formal adoptada, que relaciona la frecuencia de pico de la FTM-1D de un canal i , u_i , y su anchura de banda total a la mitad de la función en octavas, Boct, es

$$\text{Boct}(u_i) = B \exp(-u_i) + b, \quad B \geq 0, \text{ y } b > 0, \quad (4.21)$$

donde u_i , $u_i > 0$, es la frecuencia de pico del canal i y B y b son dos parámetros a estimar a partir de resultados empíricos. El valor del parámetro B determina la relación entre la anchura de banda en octavas del canal y su frecuencia de pico, de tal modo que si $B = 0$, entonces la anchura de banda en octavas es constante (e igual a b); si $B > 0$, la anchura de banda en octavas decrece con el aumento de la frecuencia de pico. El parámetro b puede ser interpretado como el valor de la anchura de banda en octavas de cualquier canal (cuando $B = 0$), o como el valor del límite inferior de la anchura de banda (cuando $B > 0$).

Computacionalmente se estimarán en primer lugar B y b ; a continuación, a partir de los valores estimados se calculará Boct. A partir de Boct, y para el canal cuya frecuencia de

pico es u_i , se calculará α , en adelante $\alpha(u_i)$ para los canales asimétricos o σ , en adelante $\sigma(u_i)$ para los canales simétricos. Conocida Boct para los canales asimétricos, $\alpha(u_i)$ se obtiene a partir de la ecuación siguiente

$$\alpha(u_i) = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{2\sqrt{2}} \times \text{Boct}(u_i) \quad (4.22)$$

y para los canales simétricos, $\sigma(u_i)$ se obtiene a partir de la ecuación siguiente

$$\sigma(u_i) = \frac{[1 + 2^{\text{Boct}(u_i)}]}{[2^{\text{Boct}(u_i)} - 1]} \times \frac{\sqrt{\ln(2)}}{\pi\sqrt{2}} \times \frac{1}{u_i}. \quad (4.23)$$

4.4. Modelos de detección

El efecto de off-frequency looking

Como se ha dicho anteriormente, para poder predecir el umbral de detección de una señal inserta en ruido a partir del modelo de enmascaramiento (ecuación 4.1), es necesario conocer el canal k que detecta la señal. Habitualmente, en los experimentos de enmascaramiento se ha supuesto que la detección de la señal viene dada por un único canal cuya frecuencia de pico coincide con la frecuencia espacial de ésta. Este supuesto simplifica la interpretación de los resultados de enmascaramiento y permite inferir directamente la forma de la FTM del canal. Sin embargo si se supone que la detección es mediada por un banco de canales, puede suceder que la señal sea detectada por un canal centrado en una frecuencia espacial diferente a la de la señal, optimizando el umbral de detección (Moore, 1997). Como se ha visto en la Introducción de este Capítulo, cuando la detección de una señal inserta en ruido es mediada por un canal centrado en una frecuencia espacial diferente a la de la señal, éste efecto recibe el nombre de off-frequency looking (Pelli, 1981; Henning et al., 1981; Perkins y Landy, 1991; Losada y Mullen, 1995). Este fenómeno no es un asunto meramente teórico sino que ha sido encontrado experimentalmente en audición (Patterson, 1976) y en visión (Pelli, 1981; Perkins y Landy, 1990). Por lo tanto, la existencia de este efecto puede hacer que cada umbral de detección en los experimentos de enmascaramiento venga dado por un canal diferente, lo que

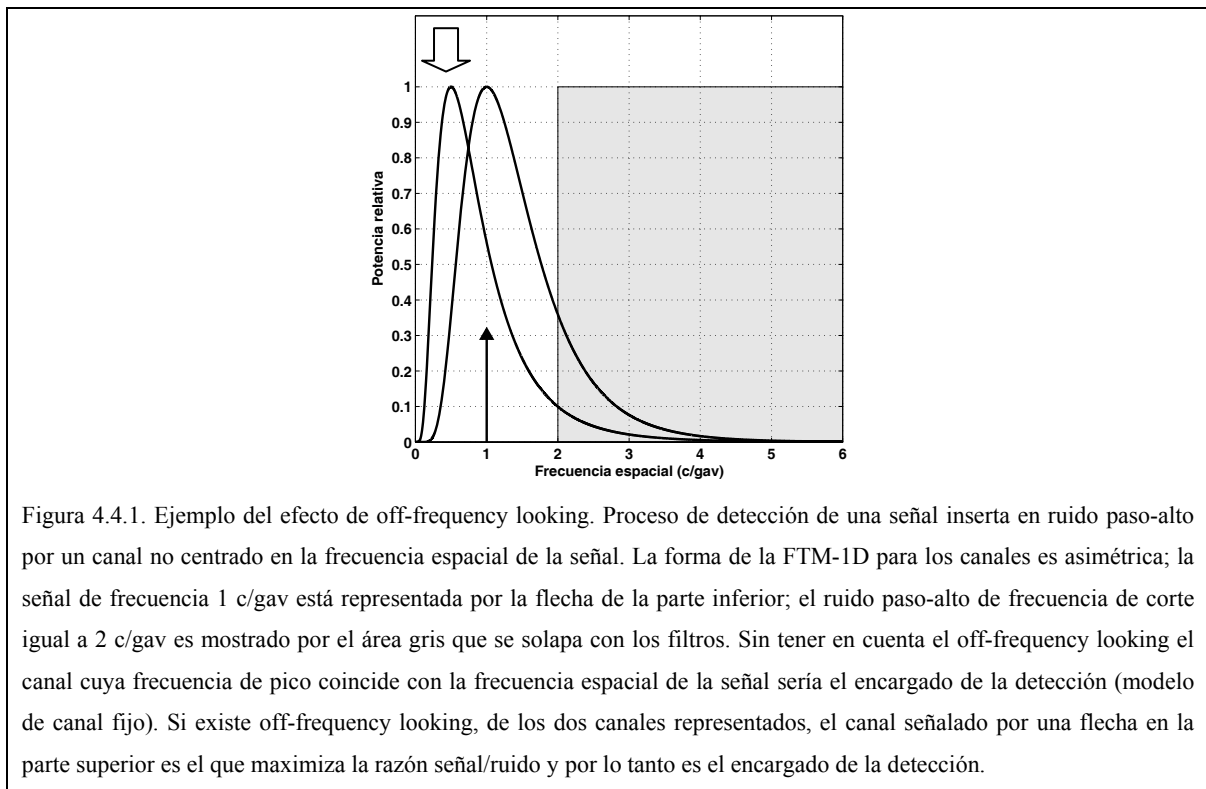


Figura 4.4.1. Ejemplo del efecto de off-frequency looking. Proceso de detección de una señal inserta en ruido paso-alto por un canal no centrado en la frecuencia espacial de la señal. La forma de la FTM-1D para los canales es asimétrica; la señal de frecuencia 1 c/gav está representada por la flecha de la parte inferior; el ruido paso-alto de frecuencia de corte igual a 2 c/gav es mostrado por el área gris que se solapa con los filtros. Sin tener en cuenta el off-frequency looking el canal cuya frecuencia de pico coincide con la frecuencia espacial de la señal sería el encargado de la detección (modelo de canal fijo). Si existe off-frequency looking, de los dos canales representados, el canal señalado por una flecha en la parte superior es el que maximiza la razón señal/ruido y por lo tanto es el encargado de la detección.

complica extraordinariamente la interpretación de los resultados experimentales. Losada y Mullen (1995) enumeran las siguientes consecuencias del mismo:

- la forma del canal no puede inferirse directamente de los resultados de enmascaramiento,
- la anchura de banda del canal estimada directamente de los resultados de enmascaramiento es una infraestimación de anchura de banda real, y
- el efecto puede ocurrir en diferentes grados dependiendo de las condiciones estímulares.

Una interpretación del off-frequency looking es que el sujeto adopta una estrategia de detección que consiste en atender al filtro que maximiza la razón señal/ruido (Perkins y Landy, 1991; Moore, 1997; López-Bascuas, 1999). Habitualmente el modo de controlar este efecto ha sido mediante el diseño de ruidos que bajo unos supuestos acerca de la forma de la FTM lo evitan o lo eliminan.

Nosotros adoptaremos una postura más neutra, es decir, tendremos en cuenta los dos tipos de detección de tal modo que para explicar los resultados experimentales de

enmascaramiento se utilizarán dos modelos de detección alternativos: modelo de detección de canal fijo y modelo de detección con canal variable (que tiene en cuenta el efecto de off-frequency looking).

En la Figura 4.4.1 se muestra un ejemplo este fenómeno para una forma asimétrica de la FTM-1D de los canales y en la que la tarea consiste en detectar una señal sinusoidal de frecuencia 1 c/gav (flecha negra de la parte inferior del gráfico) enmascarada con ruido blanco filtrado paso-alto de frecuencia de corte igual a 2 c/gav (área sombreada de la gráfica). Por simplicidad se han representado solamente dos FTM-1D; la frecuencia de pico de una de ellas coincide con la frecuencia espacial de la señal (este canal sería el responsable de la detección de la señal en el modelo de canal fijo); la otra FTM-1D (señalada por una flecha en la parte superior) sería la que maximiza la razón señal/ruido, por lo que según el modelo de canal variable sería el canal encargado de la detección de la señal.

En esta Tesis se mostrará que el efecto de off-frequency looking depende del tipo de ruido máscara utilizado y de la forma de la FTM-1D del canal (asimétrica o simétrica) supuesta. Como se verá más adelante (en el apartado 7.3.4.3), la mayoría de los ruidos máscara utilizados en este trabajo no eliminan completamente el problema del off-frequency looking por lo que las predicciones teóricas relativas a los umbrales de detección, y en consecuencia, las estimaciones de la anchura de banda de los canales visuales dependerán del modelo de detección supuesto (canal fijo o variable) (véase también Serrano-Pedraza y Sierra-Vázquez, 2005).

Así pues los modelos de detección propuestos para determinar el canal k que detecta la señal inserta en ruido son: A) modelo de detección de canal fijo, y B) modelo de detección con canal variable.

A) Modelo de detección de canal fijo: La señal (enrejado sinusoidal de frecuencia espacial u_0) inserta en ruido es detectada siempre por el canal k cuya FTM-1D ($|H(u; u_k)|$) está centrada en la frecuencia espacial de la señal, es decir $u_k = u_0$ (Patterson, 1974, 1976; Henning et al., 1981; Losada y Mullen, 1995; Solomon, 2000).

Siendo $|H(u_0; u_0)|^2 = 1$, entonces la ecuación (4.1) del modelo de enmascaramiento se transforma en

$$m_{f_0}^2(u_0, \xi, N_0) = m_0^2(u_0) + \frac{4}{s} \int_0^{+\infty} |H(u; u_0)|^2 n(u; \xi) du, \quad (4.24)$$

donde $m_{f_0}^2$ es el umbral de detección al cuadrado de la señal inserta en ruido predicho por el modelo de enmascaramiento (véase Patterson, 1974, ecuación (2); Solomon y Pelli, 1994, ecuación (1); Losada y Mullen, 1995; ecuación (6)).

B) Modelo de detección de canal variable: La señal (enrejado sinusoidal de frecuencia espacial u_0) inserta en ruido es detectada siempre por el canal k que maximiza la razón señal/ruido (“Best-Channels model” para Solomon, 2000). Es decir, el canal k con frecuencia de pico u_k que detecta la señal es aquel que maximiza $R(u_0, u_i, m_{f_0}, \xi, N_0)$, (véase el Apéndice 10), es decir

$$R(u_0, u_k, m_{f_0}, \xi, N_0) = \max_i \{R(u_0, u_i, m_{f_0}, \xi, N_0)\},$$

donde

$$\begin{aligned} R(u_0, u_i, m_{f_0}, \xi, N_0) &= \frac{P_f(u_0, u_i, m_{s_0})}{P_r(u_i, \xi, N_0)} \\ &= \frac{\frac{m_{f_0}^2(u_0)}{2} |H(u_0; u_i)|^2}{\frac{sm_0^2(u_i)}{2} + 2 \int_0^{+\infty} |H(u; u_i)|^2 n(u; \xi) du} \\ &= \frac{m_{f_0}^2(u_0) |H(u_0; u_i)|^2}{sm_0^2(u_i) + 4 \int_0^{+\infty} |H(u; u_i)|^2 n(u; \xi) du}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Haciendo $u_i = u_k$ e igualando la expresión anterior a (1/s) se obtiene la ecuación (4.1), ecuación general del modelo de enmascaramiento.

4.6. Especificación del modelo de enmascaramiento para diferentes tipos de ruido máscara

A continuación se especifica la ecuación del modelo de enmascaramiento para obtener el valor del umbral de detección al cuadrado de una señal inserta en diferentes tipos de ruido

blanco 1D filtrado ideal (paso-todo, paso-bajo, paso-alto, con muesca espectral, paso-banda y paso-banda doble). Ejemplos de imágenes de esos diferentes tipos de ruido pueden verse en el Apéndice 3. La ecuación del modelo de enmascaramiento para los distintos tipos de ruido y con los dos tipos de FTM-1D de los canales psicofísicos puede verse desarrollada en el Apéndice 7.

4.6.1. Ruido blanco 1D (ruido de banda ancha o paso-todo)

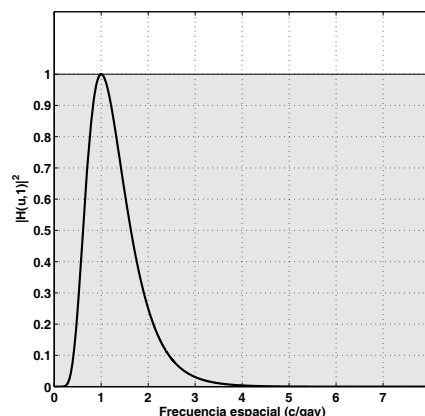
El espectro de potencia n del ruido r_{PT} blanco 1D, se puede expresar mediante una función uniforme con nivel N_0 (véase el Apéndice A.3.1.1), es decir

$$n(u; PT) = N_0.$$

Este ruido blanco 1D ha sido utilizado en numerosas ocasiones para comprobar si existe una relación lineal entre el umbral de detección al cuadrado de una señal y el nivel o densidad espectral del ruido máscara (véase por ejemplo Stromeyer y Julesz, 1972; y Pelli, 1981).

El modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas predice que el umbral de detección al cuadrado de una señal inserta en ruido paso-todo 1D es

$$m_{f_0}^2(u_0, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$



Representación del espectro de potencia de un ruido paso-todo ($N_0=1$) superpuesto a la FTM-1D al cuadrado de un canal teórico.

4.6.2. Ruido blanco 1D filtrado paso-bajo ideal

El espectro de potencia n de un ruido r_{PB} paso-bajo ideal 1D (véase el Apéndice A.3.1.2) es

$$n(u; PB) = N_0 \times [1 - \text{esc}(u - u_{PB})], \text{ para } u \geq 0,$$

donde el símbolo esc indica la función escalón o de Heaviside (Bracewell, 1986), u_{PB} es la frecuencia de corte del ruido y N_0 su nivel.

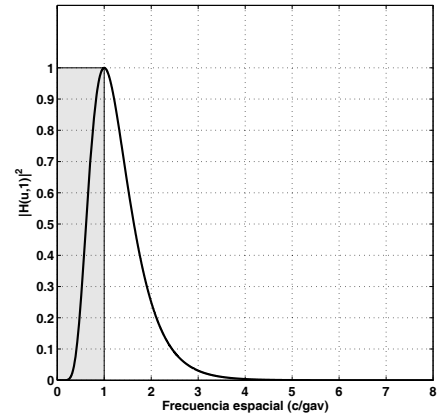
Tanto el ruido paso-bajo como el ruido paso-alto han sido utilizados para estudiar la forma y la anchura de banda de la FTM de los canales psicofísicos (Patterson, 1974, en audición; Stromeyer y Julesz, 1972; Henning et al., 1981; Pelli, 1981, en visión). Sin embargo, este tipo de ruido no elimina el problema del efecto de off-frequency looking por lo que la interpretación de los resultados empíricos puede complicarse considerablemente (véase el apartado 4.4).

El modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas predice que el umbral de detección al cuadrado de una señal inserta en ruido paso-bajo ideal 1D es

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 [1 - \text{esc}(u - u_{PB})] du}{|H(u_0; u_k)|^2},$$

o, lo que es lo mismo

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{u_{PB}} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$



Representación del espectro de potencia de un ruido paso-bajo ($N_0=1$) con frecuencia de corte $u_{PB} = 1$ c/gav, superpuesto a la FTM-1D al cuadrado de un canal teórico.

4.6.3. Ruido blanco 1D filtrado paso-alto ideal

El espectro de potencia n de un ruido r_{PA} paso-alto ideal 1D (véase el Apéndice A.3.1.3) es

$$n(u; PA) = N_0 \times \text{esc}(u - u_{PA}), \text{ para } u \geq 0,$$

donde u_{PA} es la frecuencia de corte del ruido, y N_0 el nivel.

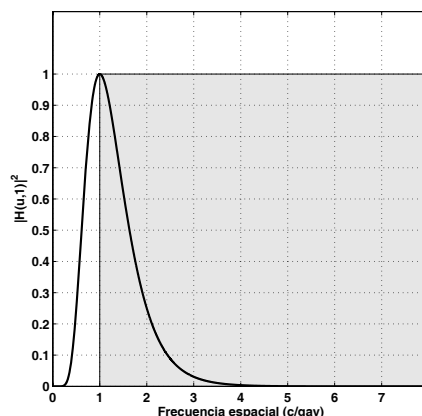
Referencias de trabajos que han utilizado este ruido puede verse en el apartado anterior.

El modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas predice que el umbral de detección al cuadrado de una señal inserta en ruido paso-alto ideal 1D es

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PA}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 \text{esc}(u - u_{PA}) du}{|H(u_0; u_k)|^2},$$

o, lo que es lo mismo

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PA}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_{u_{PA}}^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$



Representación del espectro de potencia de un ruido paso-alto ($N_0=1$) con frecuencia de corte $u_{PA} = 1$ c/gav, superpuesto a la FTM-1D al cuadrado de un canal teórico.

4.6.4. Ruido blanco 1D con muesca espectral (notch)

El espectro de potencia n del ruido r_{ME} blanco 1D con muesca espectral ideal se puede expresar mediante la suma de los espectros de potencia de dos ruidos, uno paso-bajo con

frecuencia de corte u_{PB} y otro paso-alto con frecuencia de corte u_{PA} , ambos con un nivel N_0 (véase el Apéndice A.3.1.4), es decir

$$n(u; ME) = N_0 \times [1 - \text{esc}(u - u_{PB}) + \text{esc}(u - u_{PA})], \text{ para } u \geq 0, \text{ y } u_{PA} \geq u_{PB},$$

donde la anchura espectral de la muesca (AEM, en octavas) es

$$\text{AEM} = \log_2 \left(\frac{u_{PA}}{u_{PB}} \right). \quad (4.26)$$

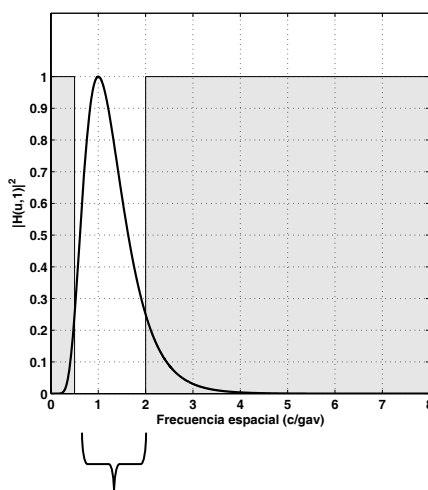
Se ha utilizado este tipo de ruido para estimar la anchura de banda de la FTM de los canales psicofísicos (Patterson, 1976; Losada y Mullen, 1995). Sin embargo, aunque no es útil para estimar la forma de las FTM, la utilización de este ruido como máscara elimina el problema del off-frequency looking si la forma de la muesca espectral coincide con la forma de la FTM del canal, es decir, si la muesca es simétrica en escala lineal, el canal también tiene que serlo (Patterson, 1976; Patterson y Nimmo-Smith, 1980; Losada y Mullen, 1995), en esta Tesis, en el Capítulo 7 se comprobará esta afirmación.

El modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas predice que el umbral de detección al cuadrado de una señal inserta en ruido paso-todo 1D con muesca espectral ideal es

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, u_{PA}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 [1 - \text{esc}(u - u_{PB}) + \text{esc}(u - u_{PA})] du}{|H(u_0; u_k)|^2},$$

o, lo que es lo mismo

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, u_{PA}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \left[\int_0^{u_{PB}} |H(u; u_k)|^2 du + \int_{u_{PA}}^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 du \right]}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$



$$AEM = \log_2 \left(\frac{u_{PA}}{u_{PB}} \right) = 2 \text{ octavas}$$

Representación del espectro de potencia de un ruido paso-todo con una muesca espectral ($N_0=1$) con anchura espectral de la muesca $AEM=2$ octavas en torno a una frecuencia espacial de 1 c/gav, es decir con frecuencias de corte $u_{PB} = 0.5$ c/gav y $u_{PA} = 2$ c/gav, superpuesto a la FTM-1D al cuadrado de un canal teórico.

4.6.5. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda ideal

El espectro de potencia n de un ruido r_{PBanda} paso-banda ideal 1D (véase el Apéndice A.3.1.5) es

$$n(u; PBanda) = N_0 \times \Pi \left(\frac{u - u_C}{Bu} \right), \text{ para } u \geq 0,$$

donde el símbolo Π indica la función impulso rectangular (Bracewell, 1986), N_0 el nivel, Bu la anchura de banda del ruido, en c/gav, y u_C la frecuencia central del ruido paso-banda.

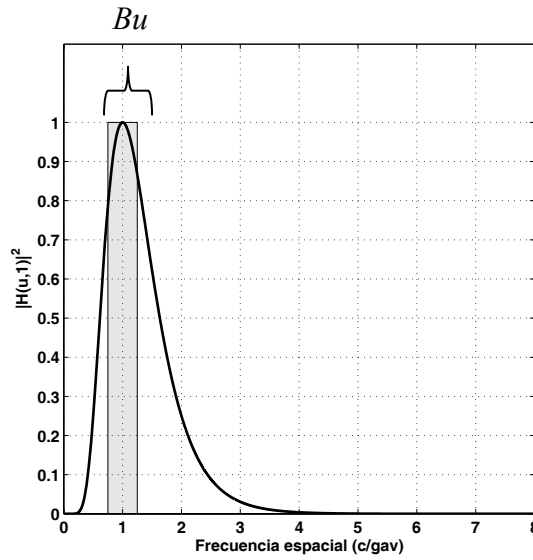
Este ruido se ha utilizado para estimar la anchura de banda y la forma de la FTM de los canales psicofísicos (Pelli, 1981; Legge y Foley, 1980, utilizando enrejados sinusoidales). Sin embargo, como en el caso de ruido paso-bajo y paso-alto, tampoco elimina el problema de efecto de off-frequency looking (Pelli, 1981; Perkins y Landy, 1991) y los resultados (anchura y forma de la FTM) obtenidos pueden verse afectados.

El modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas predice que el umbral de detección al cuadrado de una señal inserta en ruido paso-banda 1D ideal es

$$m_{f_0}^2(u_0, Bu, u_C, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{s} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 \Pi\left(\frac{u - u_C}{Bu}\right) du}{|H(u_0; u_k)|^2},$$

o, lo que es lo mismo

$$m_{f_0}^2(u_0, Bu, u_C, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{s} \int_{u_C - \frac{Bu}{2}}^{u_C + \frac{Bu}{2}} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}$$



Representación del espectro de potencia de un ruido paso-banda ($N_0=1$) con frecuencia central $u_C = 1$ c/gav, con anchura de banda del ruido paso-banda $Bu = 0.5$ c/gav y superpuesto a la FTM-1D al cuadrado de un canal teórico.

4.6.6. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda doble ideal

El espectro de potencia n de un ruido r_{PBD} paso-banda doble ideal 1D (véase el Apéndice A.3.1.6) es

$$n(u; PBD) = N_0 \times \left[\Pi\left(\frac{u - u_{C\text{inf}}}{Bu}\right) + \Pi\left(\frac{u - u_{C\text{sup}}}{Bu}\right) \right], \text{ para } u \geq 0, \text{ y } u_{C\text{sup}} \geq [u_{C\text{inf}} + Bu],$$

donde N_0 es el nivel, Bu la anchura de banda del ruido, en c/gav, $u_{C\text{inf}}$ es la frecuencia central del ruido paso-banda inferior y $u_{C\text{sup}}$ la frecuencia central del ruido paso-banda superior. La distancia espectral, (DE, en octavas), es

$$\text{DE} = \log_2 \left(\frac{u_{C\text{sup}}}{u_{C\text{inf}}} \right) \quad (4.27)$$

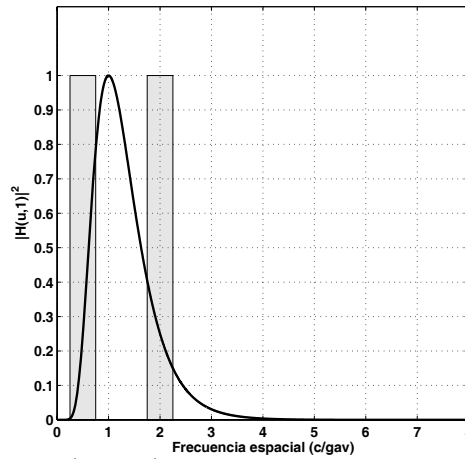
Como sucede con el ruido paso-todo con muesca espectral, este ruido se ha utilizado para estimar la anchura de banda de la FTM de los canales psicofísicos (Hutchinson y Ledgeway, 2004, con estímulos de segundo orden). Sin embargo, aunque no es útil para estimar la forma de las FTM, la utilización de este ruido como máscara atenúa considerablemente el efecto de off-frequency looking (Perkins y Landy, 1991) teniendo en cuenta lo dicho para el ruido con muesca espectral, es decir, que la forma (simétrica o asimétrica) del espectro del ruido en torno a la frecuencia de la señal coincide con la forma de la FTM del canal.

El modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas predice que el umbral de detección al cuadrado de una señal inserta en ruido paso-banda doble 1D ideal es

$$m_{f_0}^2(u_0, Bu, u_{C\text{inf}}, u_{C\text{sup}}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 \left[\Pi \left(\frac{u - u_{C\text{inf}}}{Bu} \right) + \Pi \left(\frac{u - u_{C\text{sup}}}{Bu} \right) \right] du}{|H(u_0; u_k)|^2},$$

o, lo que es lo mismo

$$m_{f_0}^2(u_0, Bu, u_{C\text{inf}}, u_{C\text{sup}}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \left[\int_{u_{C\text{inf}} - \frac{Bu}{2}}^{u_{C\text{inf}} + \frac{Bu}{2}} |H(u; u_k)|^2 du + \int_{u_{C\text{sup}} - \frac{Bu}{2}}^{u_{C\text{sup}} + \frac{Bu}{2}} |H(u; u_k)|^2 du \right]}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$



$$DE = \log_2 \left(\frac{u_{C\text{sup}}}{u_{C\text{inf}}} \right) = 2 \text{ octavas}$$

Representación del espectro de potencia de un ruido paso-banda doble ($N_0=1$) con frecuencias centrales $u_{C\text{inf}} = 0.5 \text{ c/gav}$ y $u_{C\text{sup}} = 2 \text{ c/gav}$ (distancia espectral, $DE=2$ octavas), anchura de banda del ruido paso-banda $Bu = 0.5 \text{ c/gav}$ y superpuesto a la FTM-1D al cuadrado de un canal teórico.

Capítulo 5

METODOLOGÍA GENERAL

A continuación se describe la metodología general común utilizada en todos los experimentos, es decir, los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, los estímulos, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales.

5.1. Sujetos

Dos sujetos IS (autor) y GB participaron en todos los experimentos. Ambos sujetos tienen visión normal y realizaron todos los experimentos binocularmente con pupilas naturales y estabilizando la cabeza mediante el uso de una mentonera. Los experimentos se llevaron a cabo dentro de una cabina insonorizada y sin iluminación externa salvo la luz proyectada por el monitor. Los sujetos antes de cada experimento se adaptaron a la oscuridad durante 2 min. El sujeto GB con alguna práctica en experimentos de determinación de umbrales, desconocía el objetivo de los experimentos. La participación de este sujeto fue remunerada.

5.2. Equipo

En todos los experimentos se utilizó un monitor color de 19 pulgadas EIZO Flexscan T765 (Eizo Corp., Japón) con resolución espacial de 1024×768 píxeles (horizontal \times vertical) y en modo monocromo. La presentación de imágenes digitales en el monitor se realizó utilizando la tarjeta gráfica VSG2/3F número 4a (Cambridge Research Systems Ltd, Reino Unido), alojada en un PC con procesador Pentium II-MMX a 400MHz. La tasa de refresco de la pantalla fue en todos los casos de 120Hz (60Hz por imagen completa cuando se utilizó la técnica de entrelazado (interleave) de imágenes). Las imágenes con una resolución de niveles de gris de 8 bits por píxel se presentaron a una distancia de 105 cm de tal modo que una imagen de 512×512 píxeles subtendía 8×8 grados de ángulo visual. La luminancia media (L_0) de la pantalla fue de 15 cd/m^2 en todos los experimentos.

5.3. Calibración del monitor

La corrección de la no linealidad entre el voltaje y la luminancia (corrección gamma) se realizó periódicamente utilizando el programa *ad hoc* que proporciona el fabricante de la tarjeta gráfica, que de modo automático y utilizando un fotómetro OptiCal (Cambridge Research Systems Ltd, Reino Unido) corrige la no linealidad. Esta calibración provee un rango de 2^{15} niveles de luminancia. Nótese que una mala calibración del monitor podría introducir artefactos de primer orden en los estímulos de contraste modulado (segundo orden).

5.4. Estímulos

Para cada experimento se utilizaron diferentes estímulos. En cada experimento se describirá el tipo particular de estímulos utilizados. Todos los estímulos fueron generados con anterioridad utilizando el programa MATLAB y guardados en memoria, de tal modo que el programa que controla cada experimento podía acceder a los estímulos rápidamente. La orientación de todos los estímulos fue siempre horizontal para evitar posibles artefactos del monitor cuando la frecuencia espacial del estímulo es relativamente alta (menos de 8 píxeles por ciclo) (García-Pérez y Peli, 2001). Se han utilizado básicamente dos tipos de estímulos: estímulos de luminancia o también llamados estímulos de primer orden y estímulos CM o estímulos de segundo orden. En los Apéndices 4 y 5 se puede ver una descripción completa de estos estímulos.

5.5. Presentación de los estímulos

Para la presentación de los estímulos de todos los experimentos se utilizó software propio que controla la tarjeta gráfica, creado específicamente para la realización de esta Tesis utilizando el lenguaje de programación Q-BASIC. Como se ha especificado anteriormente, el rango que proporciona la tarjeta gráfica VSG2/3F es 2^{15} , es decir, 32768 niveles de gris. Por lo tanto, para una imagen con 256 niveles de gris (8 bits) el mínimo contraste que permite esta tarjeta es de $m=0.0078$, ($256/2^{15} = 0.0078$), en unidades logarítmicas $\log_{10}(m) = -2.1079$. Por debajo de este contraste los niveles de gris empiezan a repetirse (aparecen escalones). En general los umbrales de contraste para enrejados sinusoidales con

una luminancia media de $L_0 = 15 \text{ cd/m}^2$ suelen estar por encima de este contraste mínimo. Sin embargo, para enrejados sinusoidales con frecuencias espaciales en torno a 2 c/gav puede que en algunos casos el umbral de contraste sea inferior al contraste mínimo. Para solucionar este problema se ha utilizado una técnica de presentación de estímulos entrelazados o presentación alternativa de dos estímulos (Perkins y Landy, 1991; Schofield y Georgeson, 1999, 2000; Solomon, 2000; Manahilov et al., 2003).

Técnica de entrelazado

Esta técnica consiste en la presentación temporal de dos imágenes de modo alternativo y sucesivo (frame a frame) dentro de un intervalo temporal. Al presentar dos imágenes alternativamente (cada una en una frame), lo que se percibe es una sola imagen que es la suma de las dos, con la tasa de refresco del monitor y los contrastes de las imágenes reducidos a la mitad. Teniendo en cuenta que la tasa de refresco del monitor es 120Hz, al presentar dos imágenes alternativamente, lo que se percibe es una sola imagen con una tasa de refresco de 60Hz. Respecto al contraste mínimo, con esta técnica se consigue que éste se reduzca a la mitad, obteniendo un contraste mínimo de $m=0.0039$, lo que en unidades logarítmicas es $\log(m)=-2.4089$. Para descartar un posible artefacto de esta técnica sobre la detección de un enrejado sinusoidal se realizó un experimento de control (véase el Apéndice 8). Aparte de reducir los contrastes a la mitad de las imágenes que se mezclan, esta técnica también se utilizará en esta Tesis para controlar de modo independiente el contraste de cada una de las dos imágenes, control imprescindible en los experimentos de enmascaramiento donde una imagen es la señal y la otra el ruido (véase el Apéndice A.4.2.). También en los experimentos con estímulos CM se utilizó esta técnica para poder controlar de modo independiente el contraste de la función moduladora (o profundidad de modulación) del contraste de la función portadora (véanse los Apéndices A.5.2, A.5.3 y A.5.4)

Control experimental del contraste de una imagen

La presentación en la pantalla y el control del contraste de una imagen en los experimentos se describen en el Apéndice A.2.2.

5.6. Tarea

En todos los experimentos de detección y de enmascaramiento se utilizó una tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal (2IFC, two temporal interval forced choice) sin retroalimentación de la respuesta. La tarea del sujeto fue decidir en qué intervalo temporal aparecía la señal.

5.7. Características de los ensayos

Las características de los ensayos dependen del tipo de experimento. En este trabajo los experimentos son de detección y de enmascaramiento.

Experimentos de detección

En los experimentos de detección con estímulos de primer orden (imágenes con modulación de la luminancia), cada ensayo estaba compuesto por dos intervalos temporales donde una determinada modulación de la luminancia (señal) siempre aparecía de modo aleatorio en uno de ellos, mientras que en el otro aparecía solamente luminancia media. En los experimentos con estímulos de segundo orden (estímulos CM), cada ensayo estaba compuesto también por dos intervalos temporales donde la función portadora (ruido binario 2D) era diferente en cada ensayo e intervalo (Schofield y Georgeson, 1999) y la modulación del contraste (señal) siempre aparecía de modo aleatorio en uno de los dos intervalos, mientras que en el otro aparecía solamente la función portadora sin modulación.

Experimentos de enmascaramiento

En los experimentos de enmascaramiento ya sea con estímulos de primer orden como con estímulos de segundo orden, en cada ensayo y en cada presentación se utilizó una muestra de ruido máscara estático diferente (Henning et al., 1981; Losada y Mullen, 1995), por lo tanto, no se repitió una muestra de ruido máscara en todo el experimento. Cada ensayo estaba compuesto por dos intervalos temporales donde una determinada señal inserta en ruido máscara aparecía siempre de modo aleatorio en uno de ellos, mientras que en el otro aparecía solamente el ruido máscara.

5.8. Curso temporal de los ensayos

En todos los experimentos cada ensayo estaba compuesto por dos intervalos temporales donde en cada intervalo se presentaba un estímulo, (cada uno de ellos fue marcado por un sonido diferente con una duración igual a la del intervalo). Antes de cada presentación aparecía una cruz en el centro de la pantalla. El siguiente ensayo empezaba cuando el sujeto generaba una respuesta. Tanto para la presentación de los estímulos como para la cruz se utilizó una ventana temporal gaussiana con $S_f=100$ ms y la presentación se truncó para que la duración total fuese de 500 ms. Por lo tanto cada ensayo completo tenía una duración fija de 2 segundos mas el tiempo en dar la respuesta. Los experimentos se realizaron en diferentes sesiones experimentales donde cada sesión nunca duró más de 30 min.

5.9. Procedimiento de determinación de umbrales sensoriales

En todas las determinaciones de los umbrales de detección se utilizó el mismo procedimiento, en particular, se utilizó un procedimiento bayesiano de escaleras adaptativas (véase el Apéndice 6 para una descripción más detallada). En los procedimientos adaptativos el contraste del estímulo en un ensayo depende de la respuesta dada por el sujeto en el ensayo anterior. El procedimiento bayesiano se encuentra englobado dentro de los métodos paramétricos, ya que requiere un supuesto acerca de la forma de la función psicométrica del sujeto (Normal, Logística, Escalón, Weibull, Gumbel) (Treutwein, 1995). En cada experimento, las escaleras para determinar los umbrales para cada valor de la variable independiente fueron entremezcladas aleatoriamente por bloques. A continuación se describen las características más relevantes del procedimiento bayesiano utilizado en todos los experimentos:

- a) Función de densidad de probabilidad inicial o a priori: Uniforme (Emerson, 1986).
- b) Función modelo: Logística (Pentland, 1980; Emerson, 1986; Madigan y Williams, 1987). Los parámetros de la función modelo pueden verse en el Apéndice A.6.1. (2).
- c) La selección del contraste (primer orden) o de la profundidad de la modulación (segundo orden) del estímulo en cada ensayo se obtiene calculando la media de la función de

densidad de probabilidad posterior (Emerson, 1986; King-Smith, Grigsby, Vingrys, Benes y Supowit 1994).

d) El criterio para finalizar la escalera Bayesiana fue el número de ensayos (Emerson, 1986; Madigan y Williams, 1987; Kontsevich y Tyler, 1998), en particular se realizaron 70 ensayos para cada determinación del umbral.

e) El umbral final de cada escalera se obtiene a partir de la media de la función de densidad de probabilidad final de cada escalera.

f) Se estimó el valor del umbral para una probabilidad 0.75 de la función psicométrica del sujeto.

g) El umbral total para cada estímulo en cada experimento es la media de tres umbrales finales determinados a partir de tres escaleras bayesianas de 70 ensayos cada una.

Capítulo 6

PRUEBA DE LINEALIDAD DE LOS MECANISMOS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN

6.1. Introducción

Como se ha visto en el apartado 2.4, para el procesamiento de los estímulos de contraste modulado (CM) se ha propuesto un mecanismo de segundo orden que está compuesto por dos etapas de filtrado con una rectificación interpuesta (FRF). Aunque en el mecanismo de segundo orden hay una no linealidad debido al proceso de rectificación intermedio, se ha supuesto habitualmente que los filtros de la primera y segunda etapa se comportan de un modo lineal. Como se ha dicho anteriormente, en esta Tesis suponemos que los filtros de la primera etapa del mecanismo de segundo orden son idénticos a los filtros del mecanismo de primer orden (como se puede deducir de los datos de Dakin y Mareschal, 2000), por lo tanto, es conocido que existe una gran cantidad de evidencias experimentales a favor de su linealidad. Sin embargo, respecto a los filtros de la segunda etapa, no existen resultados concluyentes acerca de su linealidad. Solamente hay un experimento de linealidad referido en la literatura realizado con estímulos de segundo orden muy diferentes a los utilizados aquí (modulaciones de la textura espacial) y dentro de un rango limitado de bajas frecuencias espaciales (0.033 a 0.533 c/gav) (Kingdom y Keeble, 1996). Por ello, el objetivo de lo que sigue es comprobar la linealidad de estos últimos filtros utilizando estímulos CM dentro de un rango de frecuencias espaciales de modulación mucho más amplio. Esta comprobación es fundamental en el trabajo ya que el supuesto de linealidad será una condición necesaria a la hora de aplicar el modelo de enmascaramiento para determinar las características de estos filtros (véase el Capítulo 8).

Existen técnicas variadas para comparar la linealidad de un sistema de procesamiento (Jáñez y Sierra-Vázquez, 1983). El problema se complica cuando se quiere comprobar la linealidad de los canales del SVH. Quizás, una forma indirecta es la comparación de la sensibilidad del SVH a funciones de onda periódica cuya transformada de Fourier es

conocida. Si el sistema visual es lineal, entonces la razón entre sensibilidades puede ser predicha por el desarrollo en serie de Fourier de las funciones de onda. Ésta es la estrategia seguida en el trabajo clásico de Campbell y Robson (1968). En efecto, en el caso de estímulos cuya luminancia es modulada en el espacio en forma de onda cuadrada, Campbell y Robson (1968) muestran que la sensibilidad del SVH para frecuencias espaciales superiores a 1 c/gav está relacionada con la amplitud del primer armónico de la serie de Fourier de la función de onda correspondiente. Al comparar la sensibilidad entre estímulos con luminancia modulada sinusoidalmente con estímulos cuya luminancia está modulada según la función de onda cuadrada, Campbell y Robson (1968) encontraron que la sensibilidad a estos últimos es $4/\pi$ veces la sensibilidad de la modulación sinusoidal (o que la razón entre las dos sensibilidades es $4/\pi$, tal como predice el desarrollo en serie de Fourier de la onda cuadrada con el mismo contraste de la onda sinusoidal). Esto muestra que el SVH, por lo menos en el umbral se comporta como de un modo lineal.

Para estudiar la linealidad del SVH con estímulos de segundo orden se ha realizado un experimento de detección basado en la idea de Campbell y Robson (1968), en el que utilizando estímulos CM, se comparan las sensibilidades entre dos tipos de modulación del contraste, una, en forma de onda sinusoidal y otra, en forma de onda cuadrada para diferentes frecuencias de modulación. Para poder interpretar los resultados de este experimento, es necesario suponer un determinado esquema (FRF) para el mecanismo de segundo orden y utilizar un determinado tipo de señal portadora de tal modo que tras la rectificación, la recuperación de la modulación sea casi perfecta. La elección de ruido binario como señal portadora cumple esta condición (como se hace notar en la Figura 2.4) siendo la salida rectificada una señal cuyo espectro posee información explícita sobre la modulación del contraste, información que es accesible directamente a los filtros de la segunda etapa (véase la Figura 6.1.1), del mismo modo que la información sobre la modulación de la luminancia es accesible a los filtros de primer orden. En efecto, con ruido binario la imagen CM se convierte en una imagen de luminancia para los filtros de la segunda etapa, con lo que el razonamiento de Campbell y Robson (1968) se puede aplicar directamente a los estímulos de segundo orden.

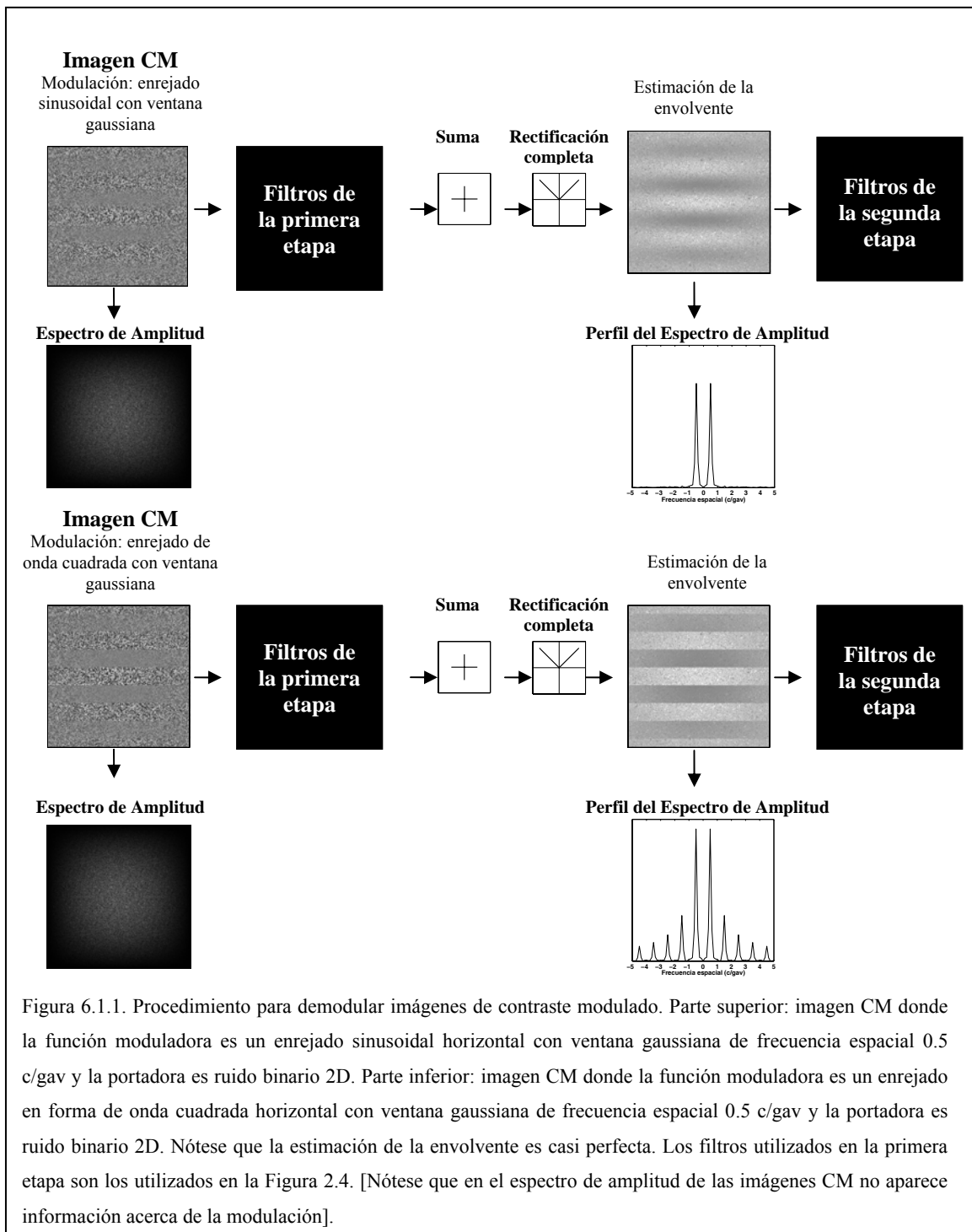


Figura 6.1.1. Procedimiento para demodular imágenes de contraste modulado. Parte superior: imagen CM donde la función moduladora es un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana de frecuencia espacial 0.5 c/gav y la portadora es ruido binario 2D. Parte inferior: imagen CM donde la función moduladora es un enrejado en forma de onda cuadrada horizontal con ventana gaussiana de frecuencia espacial 0.5 c/gav y la portadora es ruido binario 2D. Nótese que la estimación de la envolvente es casi perfecta. Los filtros utilizados en la primera etapa son los utilizados en la Figura 2.4. [Nótese que en el espectro de amplitud de las imágenes CM no aparece información acerca de la modulación].

6.2. Prueba de linealidad con estímulos de luminancia (primer orden)

Aunque el objetivo fundamental de este Capítulo es estudiar por métodos indirectos la linealidad de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden, previamente se ha realizado un experimento análogo con estímulos de primer orden para comparar luego los resultados obtenidos con estos estímulos con los resultados con estímulos de segundo orden. En este primer experimento se han obtenido los umbrales de contraste para la detección de dos tipos de señales de luminancia con modulaciones diferentes (modulación sinusoidal y modulación en forma de onda cuadrada), y para diferentes frecuencias espaciales. El objetivo fue comparar la sensibilidad del SVH para las dos señales de luminancia y confirmar una vez más la linealidad en el umbral de los filtros de primer orden.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Estímulos

Para este experimento se han utilizado dos tipos de estímulos (véase el Apéndice A.4): a) enrejado con modulación sinusoidal horizontal de la luminancia con ventana gaussiana bidimensional, L_{sinu} (Figura A.4.1 A, panel superior); y b) enrejado con modulación de la luminancia en forma de onda cuadrada horizontal con ventana gaussiana bidimensional, L_{cuad} (Figura A.4.1 A, panel inferior). Las expresiones formales para cada tipo de estímulo son las siguientes:

a) Modulación sinusoidal de la luminancia con ventana gaussiana 2D y orientación horizontal.

$$L_{\text{sinu}}(x, y) = L_0 \left[1 + m_f \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \cos(2\pi\nu_0 y + \theta) \right],$$

donde L_0 es la luminancia media, en cd/m^2 , ($L_0=15 \text{ cd/m}^2$); m_f corresponde al contraste de la modulación sinusoidal; S_x y S_y son las anchuras de la ventana gaussiana en la dirección horizontal y vertical respectivamente, en gav , ($S_x = S_y = 2.5 \text{ gav}$); ν_0 es la frecuencia espacial de modulación de la luminancia, en c/gav ; y θ es la fase, en radianes, ($\theta = 0$).

b) Modulación de onda cuadrada de la luminancia con ventana gaussiana 2D y orientación horizontal.

$$L_{\text{cuad}}(x, y) = L_0 \left[1 + m_c \exp\left(-\frac{x^2}{2S_x^2} - \frac{y^2}{2S_y^2}\right) \times q(x, y) \right],$$

donde q es la función de onda cuadrada (véase el Apéndice A.4.1); m_c corresponde al contraste de la modulación de onda cuadrada; ν_0 es la frecuencia espacial fundamental, en c/gav ; L_0 , S_x y S_y tienen el mismo significado y adoptan los mismos valores que en el estímulo descrito anteriormente.

Procedimiento

Se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección de los dos tipos de modulación de la luminancia (sinusoidal y de onda cuadrada) y para seis frecuencias espaciales (ν_0 , en c/gav), $\nu_0 \in \{0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8\}$. Cada umbral es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal y utilizando un procedimiento bayesiano de determinación de los umbrales sensoriales. Las escaleras para cada frecuencia espacial se entremezclaron de modo aleatorio por bloques. Cada sesión experimental consistió en la obtención de seis umbrales, uno por frecuencia y todos con un mismo tipo de modulación. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos por lo que aproximadamente cada sesión duró treinta minutos. En total, cada sujeto realizó seis sesiones experimentales en diferentes días.

Resultados

En la Figura 6.2.1 se presentan los resultados pertenecientes a los sujetos IS y GB. En los paneles de la columna izquierda se representa la sensibilidad al contraste y la desviación típica, ambas en unidades logarítmicas, en función de la frecuencia espacial del enrejado sinusoidal o en función de la frecuencia fundamental de la onda cuadrada (nótese que $\log_{10}(SC) = -\log_{10}(m_0)$ y puesto que $0 \leq m_0 \leq 1$ la escala para las unidades logarítmicas es positiva). En los paneles de la columna derecha está representada la sensibilidad al contraste en función de la frecuencia espacial. En la parte inferior de los gráficos de la columna derecha se ha representado, mediante una línea horizontal, el valor $4/\pi = 1.273$ y con círculos rojos, la razón entre las sensibilidades correspondientes a la modulación de la luminancia en forma de onda cuadrada y la modulación sinusoidal.

Los resultados en esas gráficas muestran lo siguiente: a) la sensibilidad al contraste en función de la frecuencia espacial para ambas modulaciones (sinusoidal y onda cuadrada) adopta la típica forma de U invertida; b) la máxima sensibilidad para ambos sujetos se encuentra dentro del rango de frecuencias espaciales desde 2 c/gav a 3 c/gav; c) la razón entre la sensibilidad al contraste para ambas modulaciones en función de la frecuencia espacial está en torno al valor $4/\pi$ para frecuencias espaciales superiores a la frecuencia espacial 1 c/gav y se incrementa para frecuencias inferiores a 1 c/gav.

Discusión

Como se aprecia en la Figura 6.2.1, los resultados son similares a los obtenidos por Campbell y Robson (1968, fig. 3) con una luminancia muy superior a la utilizada en nuestro experimento. La razón entre las sensibilidades en torno a $4/\pi$ (para frecuencias espaciales superiores a 1 c/gav) es un resultado que ha sido explicado por Campbell y Robson (1968) suponiendo que el umbral de contraste de un enrejado está determinado solamente por la amplitud del componente fundamental de su desarrollo en serie de Fourier (véase un ejemplo del espectro de amplitud en el Apéndice 4, Figura A.4.1).

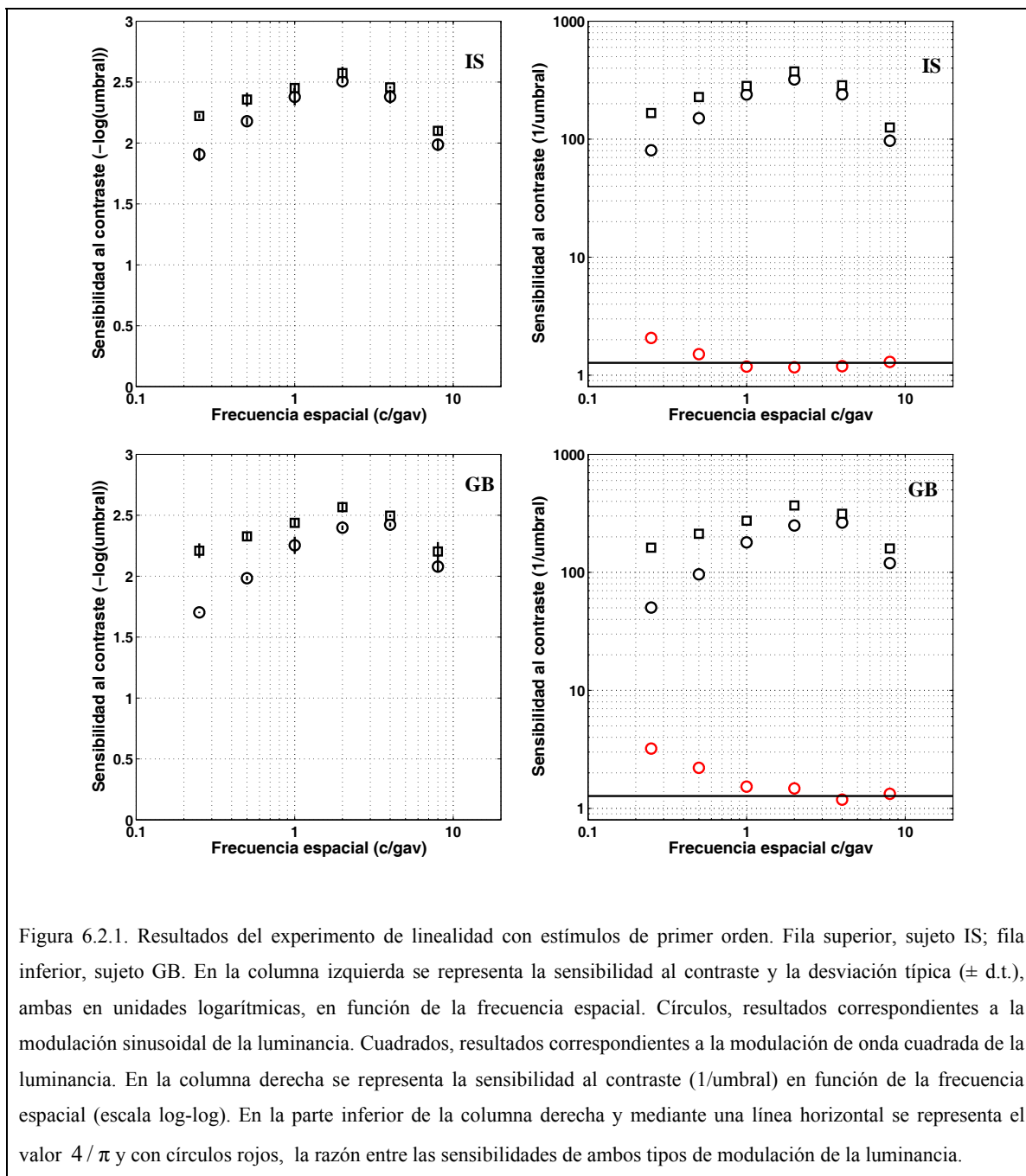


Figura 6.2.1. Resultados del experimento de linealidad con estímulos de primer orden. Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa la sensibilidad al contraste y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, en función de la frecuencia espacial. Círculos, resultados correspondientes a la modulación sinusoidal de la luminancia. Cuadrados, resultados correspondientes a la modulación de onda cuadrada de la luminancia. En la columna derecha se representa la sensibilidad al contraste ($1/\text{umbral}$) en función de la frecuencia espacial (escala log-log). En la parte inferior de la columna derecha y mediante una línea horizontal se representa el valor $4/\pi$ y con círculos rojos, la razón entre las sensibilidades de ambos tipos de modulación de la luminancia.

Para frecuencias inferiores a 1 c/gav , el incremento de esa razón fue interpretado por Campbell y Robson (1968) como un indicio de la existencia de múltiples canales. Ambos resultados tomados conjuntamente son una evidencia a favor de que el SVH con respecto a estímulos de luminancia (primer orden) se comporta (por lo menos en el umbral) de un modo lineal. García-Pérez y Sierra-Vázquez (1995) han mostrado que un modelo

multicanal compuesto por filtros lineales de banda estrecha y supuestos de detección muy elementales, puede dar razón de los umbrales de detección obtenidos con formas de modulación muy diversas (entre las que se encuentran las utilizadas en este experimento) y por lo tanto de la linealidad del SVH total. Por lo tanto, si el SVH desde un punto de vista psicofísico se comporta de modo lineal respecto al análisis de imágenes de luminancia, la inferencia más plausible es que los filtros que lo componen también se comporten de un modo lineal.

6.3. Prueba de linealidad con estímulos de contraste modulado (segundo orden)

El objetivo de este experimento es comprobar si el SVH se comporta de un modo lineal respecto a la detección de la modulación en estímulos de contraste modulado (estímulos CM). En este segundo experimento se han obtenido los umbrales de profundidad de modulación o de modulación del contraste para la detección de dos tipos de modulaciones del contraste diferentes (modulación sinusoidal y modulación en forma de onda cuadrada), y para diferentes frecuencias espaciales.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Estímulos

En este experimento se han utilizado dos tipos de estímulos (véase el Apéndice A.5): a) ruido binario 2D cuyo contraste está modulado por una onda sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D, CM_{sinu} (Figura A.5.1. C, panel superior); y b) ruido binario 2D cuyo contraste está modulado por una onda cuadrada horizontal con ventana gaussiana 2D, CM_{cuad} (Figura A.5.2. C panel superior). Las expresiones formales para cada tipo de estímulo son las siguientes:

a) Imagen de ruido binario 2D con modulación sinusoidal del contraste con ventana gaussiana 2D y orientación horizontal.

$$CM_{\text{sinu}}(x, y) = L_0 \left[1 + k(1 + m_f f(x, y)) p(x, y) \right],$$

donde L_0 es la luminancia media, en cd/m^2 , ($L_0 = 15 \text{ cd/m}^2$); m_f corresponde a la profundidad de modulación o al contraste de la función moduladora f (el control experimental de la profundidad de modulación puede verse en el Apéndice A.5.2); y k es el contraste de la función portadora p (en todos los casos $k = 0.35$).

La función moduladora del contraste, f , es un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D (véase el Apéndice A.5.1),

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \cos(2\pi\nu_0 y + \theta),$$

donde Sx y Sy son la anchura de la ventana gaussiana, en gav , $Sx = Sy = 2.5 \text{ gav}$; θ es la fase, en radianes, $\theta = 0$; ν_0 es la frecuencia espacial de modulación del contraste, en c/gav . La función portadora, p , es ruido binario 2D (véase en el Apéndice A.3.2 los detalles para su generación), cuyo contraste es modulado por la función f . Las ventajas de utilizar como función portadora ruido binario 2D han sido estudiadas en el apartado 2.2.

b) Imagen de ruido binario 2D con modulación del contraste en forma de onda cuadrada con ventana gaussiana 2D y orientación horizontal.

$$CM_{\text{cuad}}(x, y) = L_0 \left[1 + k(1 + m_c c(x, y)) p(x, y) \right],$$

donde L_0 es la luminancia media, en cd/m^2 , ($L_0 = 15 \text{ cd/m}^2$); m_c corresponde a la profundidad de modulación o al contraste de la función moduladora c (el control experimental de la profundidad de modulación puede verse en el Apéndice A.5.2); y k es el contraste de la función portadora p (en todos los casos $k = 0.35$).

La función moduladora del contraste, c , es una onda cuadrada horizontal con ventana gaussiana 2D (véase el Apéndice A.5.1),

$$c(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \times q(x, y),$$

donde q es la función de onda cuadrada (véase el Apéndice A.4.1); Sx y Sy tienen el mismo significado y adoptan los mismos valores que en el estímulo descrito anteriormente.

La función portadora (o carrier), p , es ruido binario 2D, cuyo contraste es modulado por la función c .

Procedimiento

Se obtuvieron los umbrales de profundidad de modulación para la detección de dos tipos de modulación del contraste (sinusoidal y de onda cuadrada) y para seis frecuencias espaciales de modulación, $\nu_0 \in \{0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8\}$ c/gav.

Nótese que para manipular de modo independiente los valores m_f y m_c para las imágenes CM no se puede utilizar directamente el procedimiento de control del contraste descrito en el Apéndice A.2.2. En este caso se ha utilizado la técnica de entrelazado (Schofield y Georgeson, 1999) descrita en Apéndice A.5.2.

Cada umbral es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal. En cada ensayo y en cada presentación se utilizó una muestra de ruido binario estático diferente (Schofield y Georgeson, 1999). Es decir, en cada ensayo se presentaban dos tipos diferentes de ruido binario 2D donde sólo a uno de ellos se le modulaba el contraste. La tarea del sujeto fue indicar la presentación en la que se encontraba el estímulo con modulación del contraste. Se utilizó el procedimiento bayesiano descrito para la determinación de los umbrales sensoriales. Las escaleras para cada frecuencia de modulación se entremezclaron de modo aleatorio por bloques.

Cada sesión experimental consistió en la obtención de seis umbrales, uno por frecuencia y todos con un mismo tipo de modulación. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos por lo que aproximadamente cada sesión duró treinta minutos. En total, cada sujeto realizó seis sesiones experimentales en diferentes días.

Resultados

En la Figura 6.3.1 se presentan los resultados pertenecientes a los sujetos IS y GB. En la columna izquierda se representa la sensibilidad a la modulación del contraste o sensibilidad a la profundidad de modulación y la desviación típica (en unidades logarítmicas) en

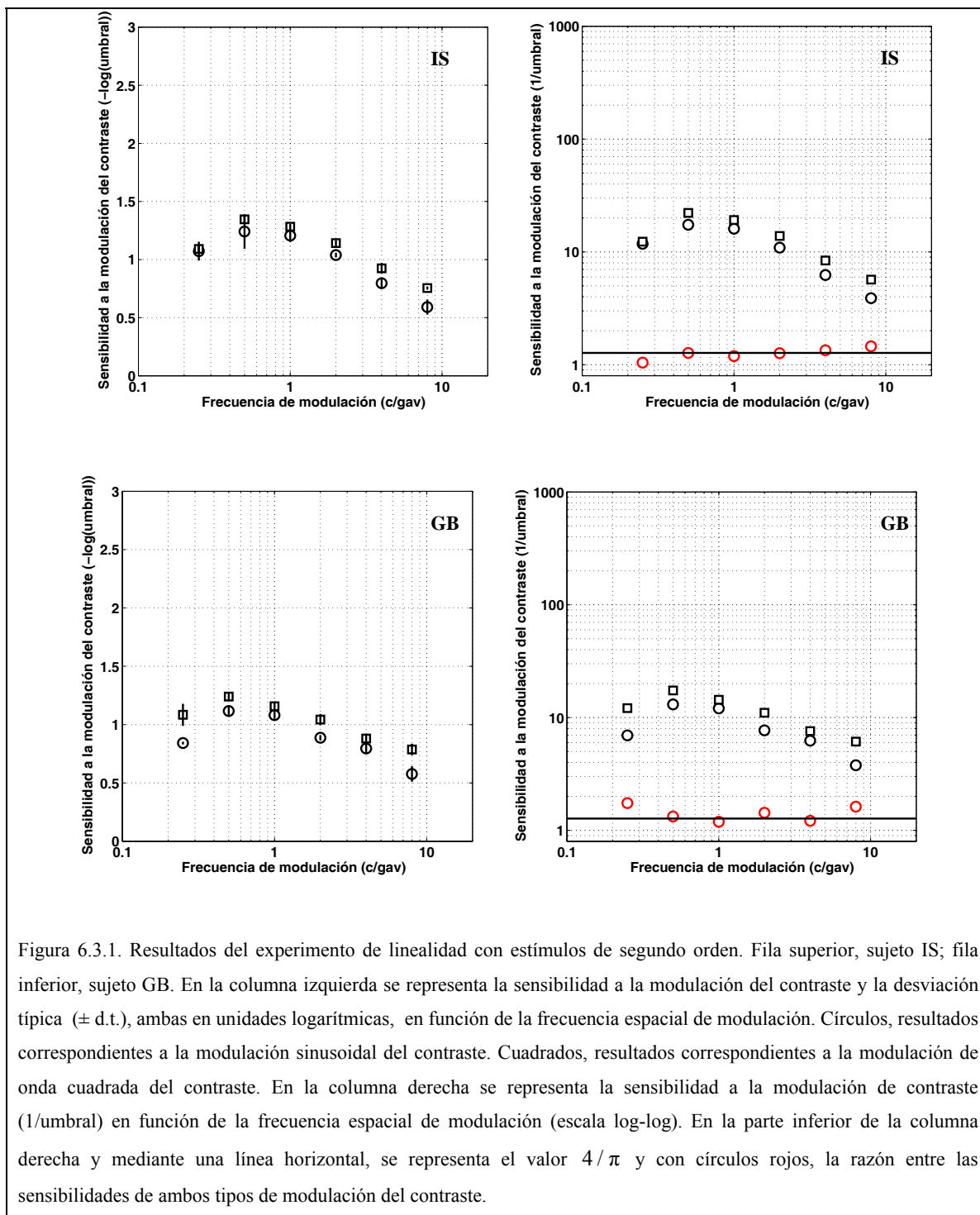


Figura 6.3.1. Resultados del experimento de linealidad con estímulos de segundo orden. Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa la sensibilidad a la modulación del contraste y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, en función de la frecuencia espacial de modulación. Círculos, resultados correspondientes a la modulación sinusoidal del contraste. Cuadrados, resultados correspondientes a la modulación de onda cuadrada del contraste. En la columna derecha se representa la sensibilidad a la modulación de contraste (1/umbral) en función de la frecuencia espacial de modulación (escala log-log). En la parte inferior de la columna derecha y mediante una línea horizontal, se representa el valor $4/\pi$ y con círculos rojos, la razón entre las sensibilidades de ambos tipos de modulación del contraste.

función de las frecuencias espaciales de modulación de la onda sinusoidal o de la onda cuadrada. En la columna derecha está representada la sensibilidad a la modulación del contraste (en unidades de contraste) en función de la frecuencia espacial de modulación.

En la parte inferior de los gráficos de la columna derecha se han representado, mediante una línea horizontal, el valor $4/\pi=1.273$ y con círculos rojos, la razón entre las sensibilidades correspondientes a la modulación de onda cuadrada y la modulación sinusoidal del contraste. Los resultados en esas gráficas muestran lo siguiente: a) la sensibilidad al contraste en función de la frecuencia espacial para ambas modulaciones del contraste (sinusoidal y onda cuadrada) adopta una forma de U invertida menos pronunciada que en el caso de estímulos de primer orden; b) la máxima sensibilidad para ambos sujetos se encuentra dentro del rango de frecuencias espaciales desde 0.5 c/gav a 1 c/gav ; y c) la razón entre la sensibilidad al contraste para ambas modulaciones en función de la frecuencia espacial está en torno al valor $4/\pi$ para todo el rango de frecuencias espaciales medidas; y d) no se aprecia un incremento de la razón de las sensibilidades para bajas frecuencias espaciales de modulación.

Discusión

Con respecto a la forma de los datos de sensibilidad a la modulación del contraste en función de la frecuencia espacial de modulación, el patrón de resultados en forma de U invertida es similar al obtenido por Schofield y Georgeson, (1999, fig. 1, sujeto AJS), también con ruido binario 2D como función portadora, aunque nuestros resultados muestran que la función de sensibilidad a la modulación del contraste (FSMC) (véase en el apartado 8.3.2 las FSMCs de cada sujeto) tiene un aspecto paso-banda más pronunciado. Schofield y Georgeson (2003) obtienen los umbrales para estímulos CM utilizando diferentes tipos de señales portadoras (ruido binario, ruido paso-alto y ruido $1/f$). Los resultados con ruido binario y ruido paso-alto son similares a los nuestros aunque su patrón de resultados revela una forma paso-bajo posiblemente porque no miden los umbrales por debajo de la frecuencia de modulación de 0.5 c/gav (véase Schofield y Georgeson, 2003, fig. 3, a, b y c). También la forma de nuestros datos se parece a la obtenida por Sutter et al., (1995, fig. 4, c y d) con una función portadora diferente (ruido isotrópico paso-banda ideal con anchura de banda de 1 octava y centrado en una frecuencia espacial de 16 c/gav).

Con respecto a la razón entre las sensibilidades para ambas modulaciones del contraste (sinusoidal y de onda cuadrada), se observa que la razón está en torno al valor $4/\pi$, y por

lo tanto siguiendo la lógica de Campbell y Robson (1968), el umbral de modulación de contraste para una imagen CM estará determinado solamente por la amplitud del componente fundamental del desarrollo en serie de Fourier de la envolvente de la imagen CM (véase la Figura 6.1.1). Por lo tanto, este resultado es una evidencia a favor de que el SVH con respecto a la detección de la modulación en estímulos de contraste modulado (segundo orden) se comporta también (por lo menos en el umbral) de un modo lineal. Pues bien, suponiendo el esquema FRF para estímulos de contraste modulado, y puesto que la recuperación de la envolvente con ruido binario es casi perfecta (véase otra vez la Figura 6.1.1), los resultados obtenidos confirman de modo indirecto que los filtros de la segunda etapa operan linealmente sobre la salida rectificadora, al igual que los filtros de primer orden (o filtros de la primera etapa) operan linealmente sobre las imágenes de luminancia. De un modo indirecto, este resultado está a favor de la rectificación completa de forma lineal aquí supuesta. Hay que decir sin embargo, que se realizó una simulación (resultados no mostrados) con otros tipos de rectificación (expansiva y compresiva) y que la razón entre la amplitudes del componente fundamental estaba entorno a $4/\pi$, de tal modo, que a partir de los resultados aquí obtenidos no es posible decidir con seguridad cual es el tipo de rectificación interpuesta del esquema FRF.

Capítulo 7

CARACTERIZACIÓN ANISOTRÓPICA DE LOS FILTROS DE PRIMER ORDEN MEDIANTE ENMASCARAMIENTO CON RUIDO VISUAL

7.1. Introducción

De acuerdo con la teoría multicanal de la visión espacial humana, el SVH, desde un punto de vista psicofísico y en lo que respecta al procesamiento de los estímulos de primer orden (variaciones espaciotemporales de luminancia), está compuesto por un conjunto de filtros lineales (canales o bandas críticas), que son mecanismos separados e independientes que operan en paralelo, y están sintonizados a un rango particular de frecuencias espaciales y orientaciones. (Campbell y Robson, 1968; Graham y Nachmias, 1971; Graham, 1989). En este Capítulo se estudiarán las características de estos mecanismos dentro del paradigma experimental de enmascaramiento y utilizando el modelo de enmascaramiento basado en la existencia de bandas críticas ya descrito en el Capítulo 4.

El objetivo de este Capítulo es caracterizar los filtros de primer orden que suponemos son idénticos a los filtros de la primera etapa del mecanismo de segundo orden. Con ello, a la vez que se pone a prueba el modelo de enmascaramiento para poder aplicarlo con seguridad a la caracterización de los filtros de la segunda etapa, se estudia cómo depende el efecto de off-frequency looking del tipo de ruido máscara utilizado.

En particular, se va a caracterizar la FTM-1D de los canales de primer orden y también se averiguará la relación entre la anchura de banda en octavas de los canales y su frecuencia de pico. Para ello se ha utilizado el paradigma de enmascaramiento y ha seguido la vía en la que se adopta un modelo de procesamiento, un modelo de detección, se predice el umbral de detección a partir del modelo de enmascaramiento (véase la ecuación (4.1)), y se compara con el obtenido empíricamente con el fin de encontrar los parámetros del modelo de procesamiento que mejor predicen los datos empíricos.

También, en este Capítulo se va a contrastar experimentalmente de modo intensivo el modelo de enmascaramiento, suponiendo dos formas para las FTM-1D de los canales psicofísicos de primer orden (asimétrica y simétrica) y dos modelos de detección (canal fijo y canal variable). Para ello se han realizado siete experimentos de detección de una señal inserta en ruido. En seis de ellos se ha utilizado como señal un enrejado sinusoidal con ventana gaussiana 2D de frecuencia espacial igual a 1 c/gav inserta en seis tipos diferentes de ruido habitualmente utilizados en psicofísica visual; en particular, ruido blanco 1D filtrado ideal paso-todo, paso-alto, paso-bajo, con muesca espectral, paso-banda y paso-banda doble. En el séptimo, se ha utilizado la misma señal de frecuencia espacial igual a 3 c/gav inserta en ruido paso-banda 1D. El uso de diferentes tipos de ruido nos ayudará a entender cómo enmascara la detección de la señal cada uno de ellos, qué información acerca de los canales se puede extraer a partir de los diferentes experimentos de enmascaramiento, y cómo el efecto de off-frequency looking depende del tipo de ruido utilizado. El uso de dos frecuencias espaciales diferentes para la señal permitirá obtener resultados empíricos acerca de la anchura de banda de los canales en diferentes localizaciones espectrales.

Por último, se comprobará la potencia explicativa del modelo de enmascaramiento cuando se utiliza ruido paso-banda 1D. Es decir, se intenta conocer cómo a partir de la caracterización de la FTM-1D de los filtros mediante los experimentos con ruido paso-banda, se pueden predecir mediante el modelo de enmascaramiento los resultados obtenidos con los otros tipos de ruidos máscara. Esta prueba es importante ya que para caracterizar los filtros de la segunda etapa solamente se ha utilizado, por las razones que se exponen en el Capítulo 8, este tipo de ruido máscara.

7.2. Experimentación

7.2.1. Detección de una señal inserta en ruido blanco o ruido paso-todo 1D

El objetivo de este experimento fue estudiar el efecto de la densidad espectral de potencia (nivel) del ruido blanco 1D sobre el umbral de contraste para la detección de una señal (enrejado sinusoidal). Para ello, se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección

de un enrejado sinusoidal horizontal (con ventana gaussiana) de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav inserto en ruido blanco 1D con diez niveles diferentes.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente. En adelante se intentará que los experimentos sean autocontenidos, por lo que habrá información repetitiva que el lector puede obviar.

Estímulos

En el experimento se ha utilizado como señal ($L_{señal}(x, y)$) un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana bidimensional (véase el Apéndice A.4.1 (a)),

$$L_{señal}(x, y) = L_0 \left[1 + m_f \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \cos(2\pi\nu_0 y + \theta) \right],$$

donde L_0 es la luminancia media, en cd/m^2 , ($L_0 = 15 \text{ cd/m}^2$); m_f corresponde al contraste de la modulación sinusoidal; Sx y Sy son las anchuras de la ventana gaussiana en la dirección horizontal y vertical respectivamente, en gav, ($Sx = Sy = 2.5 \text{ gav}$); ν_0 es la frecuencia espacial de modulación de la luminancia, en c/gav; y θ es la fase, en radianes, ($\theta = 0$). Para construir la imagen de ruido máscara ($L_{ruidoPT}(x, y)$), se ha utilizado ruido blanco 1D (paso-todo) horizontal ($r_{PT}(y)$) (véanse el apartado 4.6.1 y el Apéndice A.3.1).

$$L_{ruidoPT}(x, y) = L_0 [1 + m_r r_{PT}(y)].$$

El espectro de potencia del ruido blanco 1D es uniforme dentro del rango de frecuencias 0.125-16 c/gav. El valor del parámetro m_r depende de la muestra de ruido y de la densidad espectral de potencia (Nivel, N_0 , en $(\text{c/gav})^{-1}$) (véase el Apéndice A.3.1). En particular, en este experimento se han utilizado diez niveles diferentes:

$$N_0 \in \left\{ \begin{array}{l} 0.000976, 0.00195, 0.00390, 0.00781, 0.0156, \\ 0.0312, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5 \end{array} \right\} \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}.$$

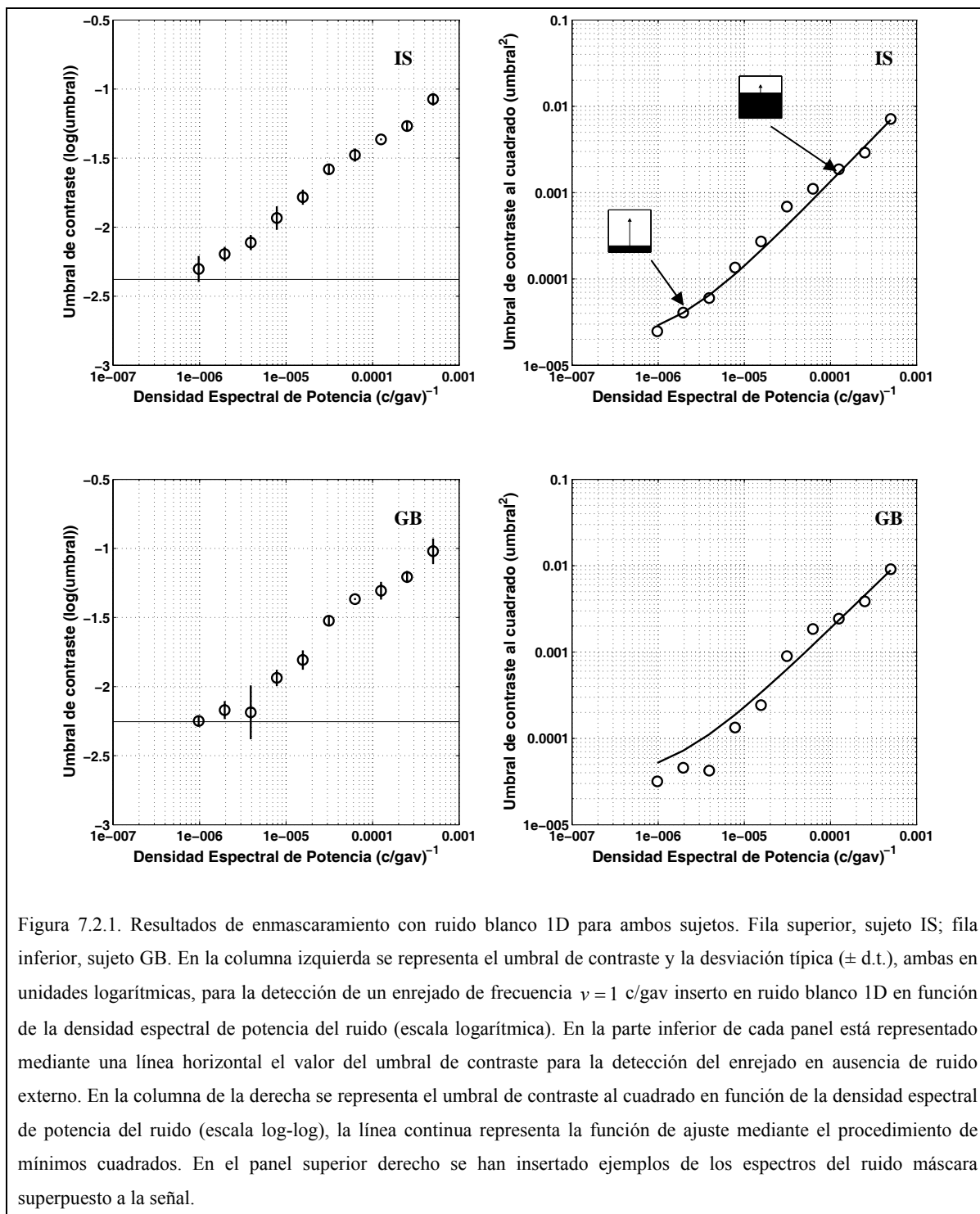


Figura 7.2.1. Resultados de enmascaramiento con ruido blanco 1D para ambos sujetos. Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa el umbral de contraste y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, para la detección de un enrejado de frecuencia $\nu = 1$ c/gav inserto en ruido blanco 1D en función de la densidad espectral de potencia del ruido (escala logarítmica). En la parte inferior de cada panel está representado mediante una línea horizontal el valor del umbral de contraste para la detección del enrejado en ausencia de ruido externo. En la columna de la derecha se representa el umbral de contraste al cuadrado en función de la densidad espectral de potencia del ruido (escala log-log), la línea continua representa la función de ajuste mediante el procedimiento de mínimos cuadrados. En el panel superior derecho se han insertado ejemplos de los espectros del ruido máscara superpuesto a la señal.

El control del contraste de la señal y el procedimiento para enmascarar la señal con ruido se puede ver en el Apéndice A.4.2.

Procedimiento

Cada umbral es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal. Se utilizó un procedimiento bayesiano de determinación de los umbrales sensoriales. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos y cada sesión experimental consistió en la obtención de cinco umbrales, uno por nivel. En total cada sujeto realizó seis sesiones experimentales en diferentes días, y cada sesión duró aproximadamente veinticinco minutos.

Resultados y discusión

Los resultados de este experimento para ambos sujetos están representados en la Figura 7.2.1. En los paneles de la columna izquierda están representados los umbrales de contraste (en unidades logarítmicas) para la detección de la señal en función del nivel del ruido blanco máscara. En la parte inferior de los dos paneles (columna izquierda) se representa mediante una línea horizontal el valor del umbral para la misma señal pero en ausencia de ruido máscara. En los paneles de la columna derecha están representados en escala log-log los umbrales de contraste al cuadrado en función del nivel del ruido blanco máscara. Ajustados los datos correspondientes al umbral de contraste al cuadrado a la función $m_{f_0}^2 = m_0^2 + aN^k$, los valores de los parámetros estimados para el sujeto IS son $a = 17.316$ y $k = 1.028$, y para el sujeto GB son $a = 14.042$ y $k = 0.969$ (línea continua en los paneles de la columna derecha de la Figura 7.2.1). Los valores de k próximos a la unidad evidencian una relación quasi-lineal entre el nivel del ruido y el umbral de contraste al cuadrado. Nótese que un valor de k próximo a la unidad en escala lineal indica una pendiente próxima a la unidad en escala log-log. Este mismo resultado ha sido obtenido en estudios psicofísicos previos para diferentes señales y con distintos tipos de ruido máscara (Stromeyer y Julesz, 1972, fig. 3; Pelli, 1981, fig. 2.1; Losada y Mullen, 1995, fig. 3; Solomon, 2000, fig. 3). Por último, si se supone que la detección de la señal inserta en ruido blanco se produce por un único filtro o canal, el incremento lineal de los umbrales al cuadrado con el nivel del ruido es una evidencia a favor del postulado 3 del modelo de enmascaramiento (véase el Capítulo 4, apartado 4.2), es decir, en el umbral de detección de la señal inserta en ruido, la razón señal/ruido es constante (véase la ecuación 4.24, donde n

es una función constante e idénticamente igual a N_0). Una conclusión derivada, pero importante, es que la forma de la FTM-1D del canal no cambia con el nivel del ruido, es decir, la FTM-1D no es dependiente del nivel.

7.2.2. Detección de una señal inserta en ruido paso-bajo y paso-alto 1D

El objetivo de este experimento fue estudiar el efecto del ruido blanco 1D filtrado paso-bajo y paso-alto ideales, sobre el umbral de detección de una señal (enrejado sinusoidal) en función de las frecuencias de corte inferior y superior para cada ruido. Para ello se realizaron dos experimentos donde se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección de un enrejado sinusoidal horizontal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav inserto en ruido paso bajo o paso-alto con diferentes frecuencias de corte.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Estímulos

La señal utilizada en este experimento es un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D tal y como se ha descrito en el apartado 7.2.1, donde la frecuencia espacial de la señal es $\nu_0 = 1$ c/gav.

Como ruido máscara se han utilizado dos tipos de ruido ($L_{ruidoPB}(x, y)$ y ($L_{ruidoPA}(x, y)$):

a) Ruido paso-bajo 1D horizontal ($r_{PB}(y)$) (véanse el apartado 4.6.2 y el Apéndice A.3.1.2), cuyo espectro de potencia es uniforme dentro del rango de frecuencias 0.125 - ν_{PB} c/gav.

$$L_{ruidoPB}(x, y) = L_0 [1 + m_r r_{PB}(y)].$$

b) Ruido paso-alto 1D horizontal ($r_{PA}(x, y)$) (véanse el apartado el 4.6.3 y el Apéndice A.3.1.3), cuyo espectro de potencia es uniforme dentro del rango de frecuencias ν_{PA} - 16 c/gav.

$$L_{ruidoPA}(x, y) = L_0 [1 + m_r r_{PA}(y)].$$

El valor del parámetro m_r depende del tipo de ruido y de la densidad espectral de potencia (véase el Apéndice A.3.1 para su cálculo). En particular, en este experimento, se ha utilizado para todos los ruidos máscara la misma densidad espectral de potencia $N_0 = 0.5 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$. El control del contraste de la señal y el procedimiento para enmascarar la señal con ruido se puede ver en el Apéndice A.4.2.

Procedimiento

Se han realizado dos experimentos, utilizando en cada uno de ellos un tipo de ruido diferente (paso-bajo o paso-alto), ambos con el mismo nivel. En el experimento en el que se utilizó ruido paso-bajo como estímulo enmascarador se fijaron cinco frecuencias de corte (ν_{PB}) del ruido, en particular, desde $\nu_{PB} = 0.25$ c/gav hasta $\nu_{PB} = 1$ c/gav en pasos de media octava. Nótese que estos pasos son aproximados ya que el valor exacto de la frecuencia de corte no se puede conseguir en algunos casos debido a la frecuencia de muestreo de la imagen en el dominio de Fourier. En el experimento en el que se utilizó como estímulo máscara el ruido paso-alto, se fijaron seis frecuencias de corte (ν_{PA}) del ruido, en particular, desde $\nu_{PA} = 1$ c/gav hasta $\nu_{PA} = 5.656$ c/gav en pasos de media octava. Cada umbral de detección de la señal inserta en ruido es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal. Se utilizó un procedimiento bayesiano de determinación de los umbrales sensoriales. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos y cada sesión experimental consistió en la obtención de cinco umbrales en el caso de ruido paso-bajo y seis umbrales en el caso de ruido paso-alto. En total cada sujeto realizó seis sesiones experimentales en diferentes días; aproximadamente cada sesión duró veinticinco minutos para ruido paso-bajo y treinta minutos para ruido paso-alto.

Resultados y discusión

Los resultados de este experimento para ambos sujetos están representados en la Figura 7.2.2. En los paneles de la columna izquierda están representados los umbrales de contraste (en unidades logarítmicas) para la detección de la señal inserta en ruido paso-bajo y paso-

alto máscara, en función de las frecuencias de corte de los ruidos. En la parte inferior de los dos paneles (columna izquierda) se representa mediante una línea horizontal el valor del umbral para la detección de la misma señal pero en ausencia de ruido máscara externo. En la columna derecha están representados en escala lineal los umbrales de contraste al cuadrado en función de la frecuencia de corte de los ruidos paso-alto y paso-bajo. Como se puede ver en la Figura 7.2.2, el umbral de detección al cuadrado crece con la proximidad de la frecuencia de corte del ruido a la frecuencia de la señal, resultado similar al obtenido por otros (Stromeyer y Julesz, 1972, fig. 4 y 5; Pelli, 1981, fig. 3.5; Henning et al., 1981, fig. 3, 4 y 5; Losada y Mullen, 1995, con ruido $1/f$, fig. 6).

La forma en la que el umbral al cuadrado crece con la frecuencia de corte es diferente para cada tipo de ruido (paso-bajo y paso-alto), es decir, aparece una cierta asimetría en el enmascaramiento, resultado que ha sido encontrado en estudios previos (Legge y Foley, 1980; Henning et al., 1981; Losada y Mullen, 1995). En efecto, si observamos los datos de la Figura 7.2.2, y comparamos el umbral de detección de la señal inserta en ruido paso-bajo con el umbral de la señal inserta en ruido paso-alto, para una frecuencia de corte de 1 c/gav , se observa que el ruido paso-alto para ambos sujetos, enmascara más que el ruido paso-bajo. Henning et al., (1981) toman la forma de los umbrales de detección (en unidades logarítmicas) como una indicación directa de la forma de las FTM-1D de los canales psicofísicos, e infieren que su forma en escala logarítmica es asimétrica. Sin embargo, supóngase que: a) la detección de la señal se produce por un único canal con una forma paso-banda para su FTM, b) que está centrado en la frecuencia espacial de la señal, y c) que el umbral al cuadrado es proporcional a la cantidad de ruido que pasa por el canal. Entonces lo que revelaría esta diferencia de enmascaramiento es por el contrario una forma asimétrica en escala lineal (forma simétrica en escala logarítmica), ya que el espectro de potencia del ruido (paso-bajo y paso-alto) es uniforme en escala lineal, no en escala logarítmica.

Cuando se utiliza este tipo de ruido (paso-bajo y paso-alto) puede ocurrir que la detección de la señal se produzca por un canal que no está centrado en la frecuencia de la señal (efecto de off-frequency looking). En este trabajo, a la hora de analizar los datos

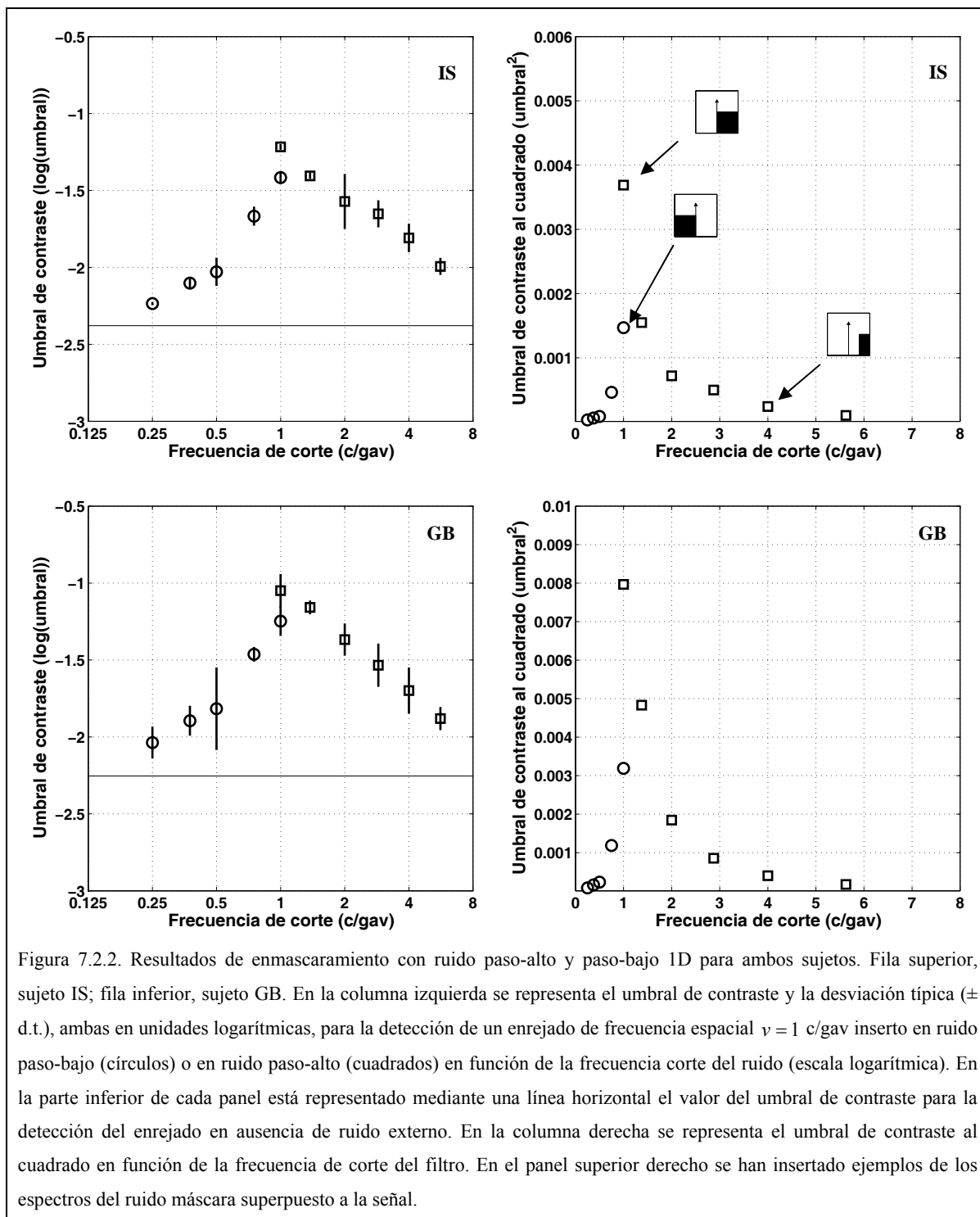


Figura 7.2.2. Resultados de enmascaramiento con ruido paso-alto y paso-bajo 1D para ambos sujetos. Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa el umbral de contraste y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, para la detección de un enrejado de frecuencia espacial $\nu = 1$ c/gav inserto en ruido paso-bajo (círculos) o en ruido paso-alto (cuadrados) en función de la frecuencia corte del ruido (escala logarítmica). En la parte inferior de cada panel está representado mediante una línea horizontal el valor del umbral de contraste para la detección del enrejado en ausencia de ruido externo. En la columna derecha se representa el umbral de contraste al cuadrado en función de la frecuencia de corte del filtro. En el panel superior derecho se han insertado ejemplos de los espectros del ruido máscara superpuesto a la señal.

(en el apartado 7.4 más adelante), se tendrán en cuenta dos modelos de detección, es decir, cuando el canal que detecta está emparejado con la señal, y cuando el canal que detecta es el que maximiza la razón señal/ruido.

7.2.3. Detección de una señal inserta en ruido blanco 1D con muesca espectral (notch)

El objetivo de este experimento fue estudiar el efecto enmascarador del ruido blanco 1D con muesca espectral de diferentes anchuras sobre los umbrales de contraste para la detección de una señal. Para ello se realizó un experimento donde se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección de un enrejado sinusoidal horizontal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav inserto en ruido blanco con muesca espectral cuya anchura varía en octavas y , la forma de la muesca es asimétrica (en escala lineal) con respecto a la frecuencia espacial de la señal.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Estímulos

La señal utilizada en este experimento es un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D tal y como se ha descrito en el apartado 7.2.1, donde la frecuencia espacial de la señal es $\nu_0 = 1$ c/gav.

Para construir la imagen de ruido máscara ($L_{ruidoME}(x, y)$) se ha utilizado ruido blanco o ruido paso-todo 1D horizontal con muesca espectral ($r_{ME}(y)$) (véanse el apartado 4.6.4 y Apéndice A.3.1.4), donde el espectro de potencia es uniforme dentro del rango de frecuencias $0.125 - \nu_{PB}$ c/gav y $\nu_{PA} - 16$ c/gav, donde la distancia entre ν_{PB} y ν_{PA} es la anchura espectral de la muesca (AEM).

$$L_{ruidoME}(x, y) = L_0 [1 + m_r r_{ME}(y)].$$

Físicamente, este ruido es la suma de ruido paso-bajo y ruido paso-alto. Y por lo tanto ν_{PB} es la frecuencia de corte del ruido paso-bajo y ν_{PA} es la frecuencia de corte del ruido paso-alto. El valor del parámetro m_r depende del tipo de ruido y de la densidad espectral de potencia (véase el Apéndice A.3.1 para su cálculo). El nivel del ruido fue siempre $N_0 = 0.5 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$. El control del contraste de la señal y el procedimiento para enmascarar la señal con ruido se puede ver en el Apéndice A.4.2.

Procedimiento

En el experimento se manipuló la anchura espectral de la muesca (AEM, en octavas) manteniendo el mismo nivel del ruido. En particular se establecieron seis anchuras asimétricas (en escala lineal) de la muesca $\text{AEM} \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, en torno a la frecuencia espacial de la señal $\nu_0 = 1 \text{ c/gav}$, donde $\text{AEM} = \log_2(\nu_{PA} / \nu_{PB})$. Así por ejemplo, para una anchura de $\text{AEM} = 2$ octavas, las frecuencias de corte son $\nu_{PB} = 0.5 \text{ c/gav}$ y $\nu_{PA} = 2 \text{ c/gav}$. Cada umbral es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal. Como en los experimentos anteriores, en cada ensayo se presentaban dos muestras diferentes de ruido donde sólo en uno de ellos se encontraba inserta la señal. Se utilizó un procedimiento bayesiano de determinación de los umbrales sensoriales. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos y cada sesión experimental consistió en la obtención de seis umbrales (uno por anchura de la muesca espectral). En total cada sujeto realizó tres sesiones experimentales en diferentes días; la duración de cada sesión fue aproximadamente de treinta minutos.

Resultados y discusión

Los resultados de este experimento para ambos sujetos están representados en la Figura 7.2.3. En los paneles de la columna izquierda están representados los umbrales de contraste (en unidades logarítmicas) para la detección de la señal inserta en ruido blanco 1D horizontal con muesca espectral en función de las anchuras de banda de la muesca. En la parte inferior de los dos paneles (columna izquierda) se ha representado mediante una línea

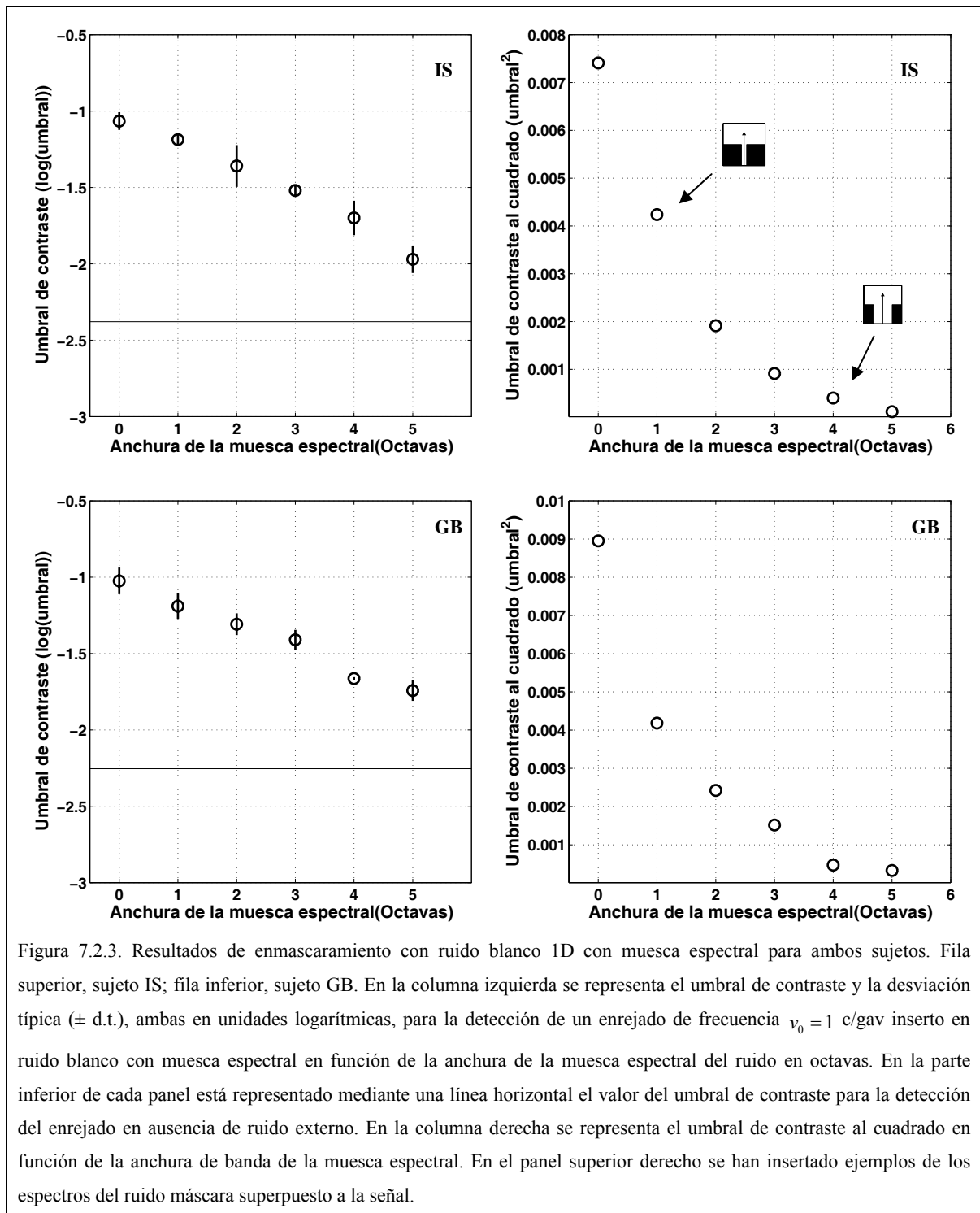


Figura 7.2.3. Resultados de enmascaramiento con ruido blanco 1D con muesca espectral para ambos sujetos. Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa el umbral de contraste y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, para la detección de un enrejado de frecuencia $\nu_0 = 1$ c/gav inserto en ruido blanco con muesca espectral en función de la anchura de la muesca espectral del ruido en octavas. En la parte inferior de cada panel está representado mediante una línea horizontal el valor del umbral de contraste para la detección del enrejado en ausencia de ruido externo. En la columna derecha se representa el umbral de contraste al cuadrado en función de la anchura de banda de la muesca espectral. En el panel superior derecho se han insertado ejemplos de los espectros del ruido máscara superpuesto a la señal.

horizontal el valor del umbral para la misma señal pero en ausencia de ruido máscara externo. En los paneles de la columna derecha están representados los mismos umbrales

pero en unidades de contraste al cuadrado en función de las anchuras de banda de la muesca del ruido máscara. Como se puede ver en la Figura 7.2.3 el umbral al cuadrado para la detección de la señal inserta en ruido paso-todo con muesca espectral decrece con el aumento de la anchura de la muesca. Este resultado ha sido obtenido anteriormente por otros autores pero utilizando ruido $1/f$, (Losada y Mullen, 1995, fig. 5; Mullen y Losada, 1999, fig. 5). El ruido paso-todo con muesca espectral ha sido utilizado en experimentos auditivos de enmascaramiento porque supuestamente elimina el efecto del off-frequency listening (Patterson, 1974 y 1976), y también ha sido utilizado en experimentos visuales ya que supuestamente elimina el efecto del off-frequency looking (Losada y Mullen, 1995). Como ya se ha dicho (véase apartado 4.6.4), este problema se elimina cuando coincide la forma de la anchura de la muesca espectral con la forma del canal.

7.2.4. Detección de una señal inserta en ruido paso-banda 1D

En este experimento se ha estudiado el efecto enmascarador del ruido blanco 1D filtrado paso-banda ideal, situado en diferentes lugares del espectro (con diferentes frecuencias centrales) sobre el umbral de contraste para la detección de una señal. En particular, se han realizado dos experimentos de enmascaramiento con ruido paso-banda, en uno se utilizó como señal un enrejado sinusoidal horizontal de frecuencia espacial igual a 1 c/gav y en otro la misma señal pero de frecuencia espacial igual a 3 c/gav. Se eligieron estas frecuencias espaciales porque están separadas más allá de una octava y además se encuentran dentro del rango donde el SVH tiene máxima sensibilidad. El objetivo principal fue comprobar el efecto enmascarador de este ruido en diferentes partes del espectro y estudiar cómo varía la anchura de banda de los canales con la frecuencia de pico. Además, este experimento es clave en esta Tesis ya que en segundo orden para caracterizar los filtros de la segunda etapa se realizará un experimento similar pero con estímulos CM. Por último este experimento se utilizará para comprobar la potencia explicativa del modelo de enmascaramiento.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Estímulos

Se han realizado dos experimentos diferentes, en los que se ha utilizado como señal un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D tal y como se ha descrito en el apartado 7.2.1. En el primer experimento se utilizó una señal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav y en el segundo experimento una señal de frecuencia espacial $\nu_0 = 3$ c/gav.

Para construir la imagen de ruido máscara ($L_{ruidoPBanda}(x, y)$) se ha utilizado ruido paso-banda 1D horizontal ($r_{PBanda}(y)$) con una anchura de banda $B\nu = 0.5$ c/gav y centrada en una determinada frecuencia espacial (ν_C) (véanse el apartado 4.6.5 y Apéndice A.3.1.5). El espectro de potencia es uniforme dentro del rango de frecuencias $\left[\nu_C - \frac{B\nu}{2} \right]$ y $\left[\nu_C + \frac{B\nu}{2} \right]$ c/gav.

$$L_{ruidoPBanda}(x, y) = L_0 \left[1 + m_r r_{PBanda}(y) \right].$$

El valor del parámetro m_r depende del tipo de ruido y de la densidad espectral de potencia (véase el Apéndice A.3.1 para su cálculo). La densidad espectral de potencia del ruido fue siempre $N_0 = 0.5 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$. El control del contraste de la señal y el procedimiento para enmascarar la señal con ruido se puede ver en el Apéndice A.4.2.

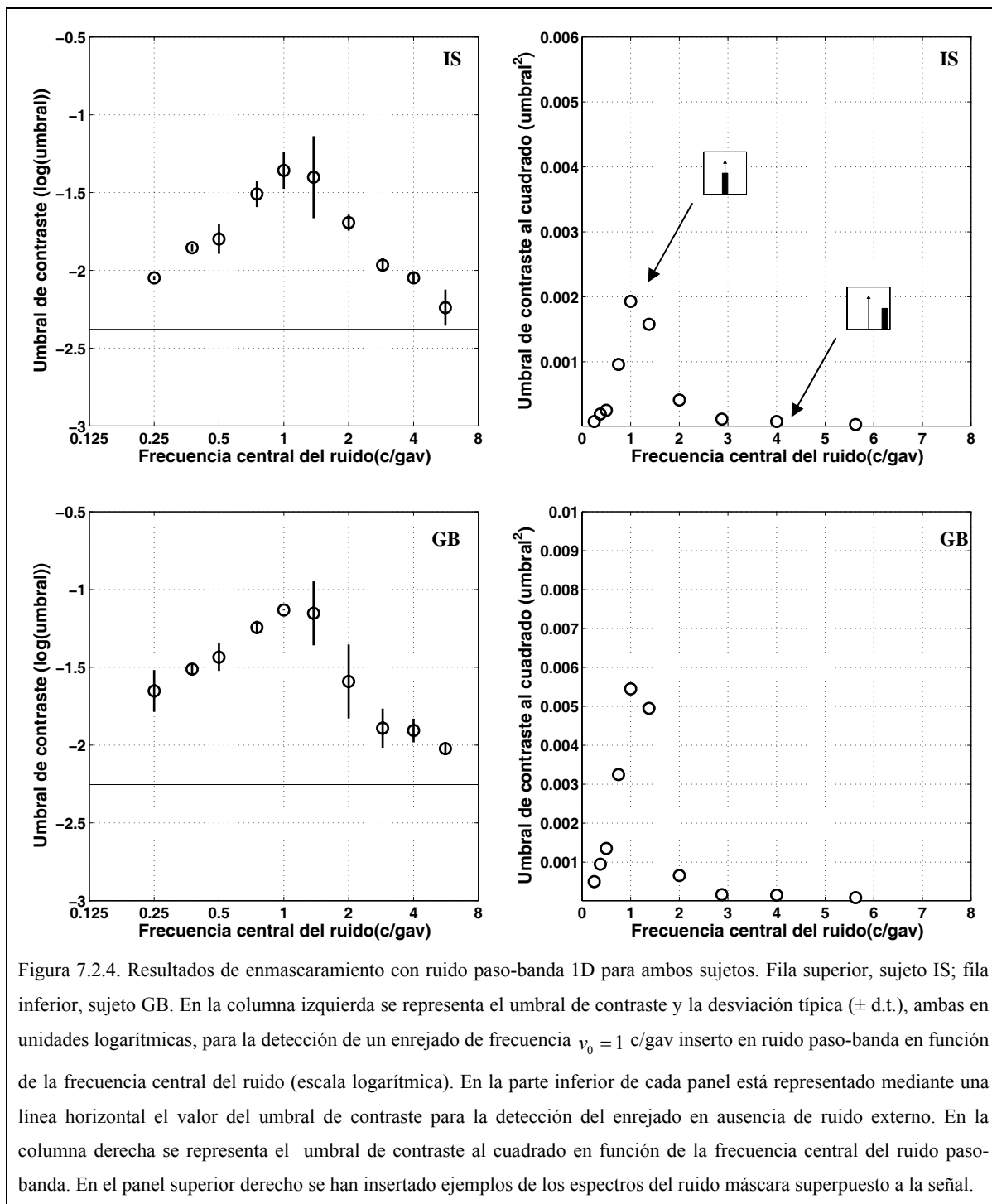
Procedimiento

En el primer experimento, se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección de una señal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav inserta en ruido paso-banda centrado en diferentes frecuencias espaciales; en particular, se utilizaron diez frecuencias centrales, desde $\nu_C = 0.25$ c/gav hasta $\nu_C = 5.656$ c/gav en pasos de media octava. En el segundo experimento, se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección de una señal de frecuencia espacial $\nu_0 = 3$ c/gav inserta en ruido paso-banda con una anchura de $B\nu = 0.5$

c/gav y diferentes frecuencias centrales, en particular nueve frecuencias centrales que van desde $\nu_c = 0.75$ c/gav hasta $\nu_c = 12$ c/gav en pasos de media octava. A la vez se determinó el umbral para la detección de la señal de frecuencia espacial $\nu_0 = 3$ c/gav en ausencia de ruido. Como se dijo en el apartado 7.2.3, estos pasos son aproximados ya que el valor exacto de la frecuencia central no se puede conseguir en algunos casos debido a la frecuencia de muestreo de la imagen en el dominio de Fourier. En cada experimento, cada umbral de contraste es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal. En cada ensayo y en cada presentación se utilizaron muestras de ruido paso-banda estático diferente. Se utilizó un procedimiento bayesiano de determinación de los umbrales sensoriales. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos. En ambos experimentos cada sesión experimental consistió en la obtención de cinco umbrales (uno por frecuencia central del ruido paso-banda). En total cada sujeto realizó seis sesiones experimentales en diferentes días; la duración de cada sesión fue aproximadamente de veinticinco minutos.

Resultados y discusión

En las Figuras 7.2.4 y 7.2.5 se muestran los resultados de los experimentos realizados por los sujetos, IS y GB. En la Figura 7.2.4 están representados los resultados del experimento en el que se utilizó como señal un enrejado sinusoidal horizontal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav y en la Figura 7.2.5, los resultados para la señal de frecuencia espacial $\nu_0 = 3$ c/gav. En los paneles de la columna izquierda de ambas figuras están representados los umbrales de contraste (en unidades logarítmicas) y las desviaciones típicas para la detección de la señal inserta en ruido paso-banda 1D horizontal en función de las frecuencias centrales de los ruidos máscara. En la parte inferior de los dos paneles (columna izquierda) se ha representado mediante una línea horizontal el valor del umbral para la misma señal pero en ausencia de ruido.



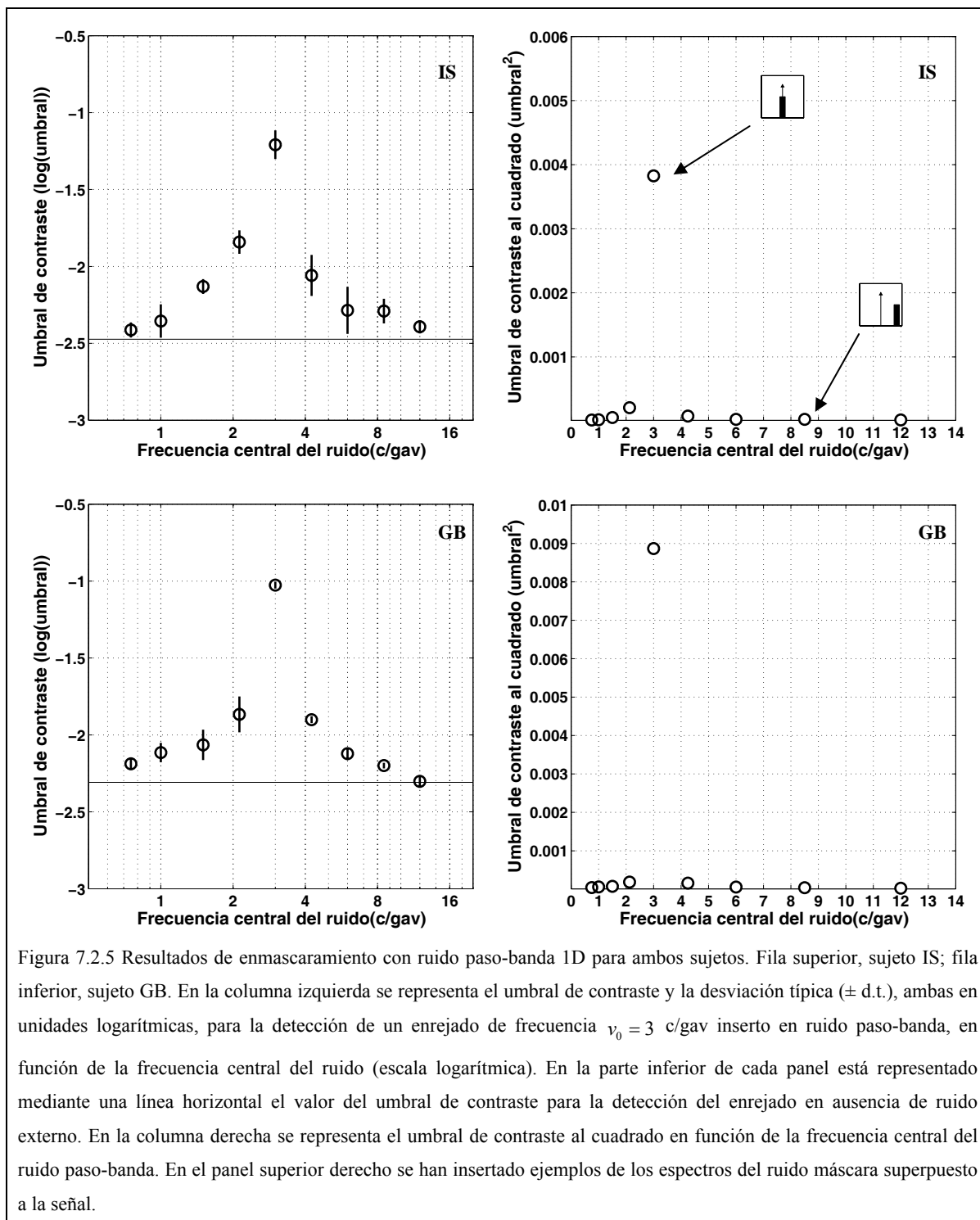
En los paneles de la columna derecha de ambas figuras están representados los mismos umbrales pero en unidades de contraste al cuadrado. Como se puede ver en ambas figuras,

el umbral de detección crece con la proximidad de la frecuencia central del ruido paso-banda a la frecuencia espacial de la señal (Pelli, 1981; Perkins y Landy, 1991).

Además, como en el caso de ruido paso-bajo y paso-alto, aparece una cierta asimetría (en escala logarítmica y en escala lineal) en el enmascaramiento, más pronunciada para la señal de frecuencia $\nu_0 = 1$ c/gav, puesto que el enmascaramiento parece diferente cuando la frecuencia central del ruido es inferior a la frecuencia de la señal que cuando la frecuencia es superior. Estos resultados son similares a los obtenidos por Pelli, (1981, fig. 3.4), con ruidos paso-banda con anchuras de banda de 1 y 2 c/gav y una señal de frecuencia 4 c/gav, y Legge y Foley (1980, fig. 3) utilizando como ruido máscara enrejados sinusoidales de diferentes frecuencias espaciales y señal de frecuencia 2 c/gav.

Si suponemos que un único canal detecta la señal, y además está centrado en la frecuencia espacial de ésta, entonces los datos de enmascaramiento obtenidos con ruido paso-banda estrecho mostrarían aproximadamente la forma de la FTM-1D del canal que detecta. Pero también con este tipo de ruido máscara puede darse el efecto de off-frequency-looking (Perkins y Landy, 1991) y por tanto a partir de los resultados de enmascaramiento no se puede deducir directamente las características de la FTM, ya que canales diferentes podrían estar actuando en la determinación de cada umbral.

Por último, comparando los datos de enmascaramiento para los dos tipos de señal (1 y 3 c/gav) y suponiendo que en la detección de cada señal subyace un único canal centrado en la frecuencia espacial de ésta, se aprecia que la anchura de banda en octavas del canal centrado en 1 c/gav es mayor que la del centrado en 3 c/gav, y por tanto, se puede concluir que la anchura de banda del canal decrece con el aumento de la frecuencia de pico de éste. Resultado que como se verá en el apartado 7.4 coincide con resultados experimentales previos.



7.2.5. Detección de una señal inserta en ruido paso-banda doble 1D

El objetivo de este experimento fue estudiar el efecto enmascarador del ruido blanco 1D filtrado paso-panda doble ideal con diferentes distancias espectrales entre los ruidos paso-banda componentes sobre el umbral de contraste para la detección de una señal. Para ello se realizó un experimento donde se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección de un enrejado sinusoidal horizontal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav inserto en ruido paso-banda doble cuya distancia espectral varía en octavas y , la forma su espectro es asimétrica (en escala lineal) con respecto a la frecuencia espacial de la señal.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Estímulos

La señal utilizada en este experimento es un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D tal y como se ha descrito en el apartado 7.2.1, donde la frecuencia espacial de la señal es $\nu_0 = 1$ c/gav.

Para construir la imagen de ruido máscara ($L_{ruidoPT}(x, y)$) se ha utilizado ruido paso-banda doble 1D horizontal ($r_{PBD}(y)$), formado por dos ruidos paso-banda con una anchura $B\nu = 0.5$ c/gav y centrado cada uno de ellos en una determinada frecuencia espacial (ν_{Cinf} y ν_{Csup}) (véase el apartado 4.6.6 y Apéndice A.3.1.6). El espectro de potencia del ruido es uniforme dentro del rango de frecuencias $\left[\nu_{Cinf} - \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ y $\left[\nu_{Cinf} + \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ c/gav y dentro del rango $\left[\nu_{Csup} - \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ y $\left[\nu_{Csup} + \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ c/gav, donde la distancia entre ν_{Cinf} y ν_{Csup} es la distancia espectral (DE) entre los dos ruidos paso-banda componentes.

$$L_{ruidoPBD}(x, y) = L_0 [1 + m_r r_{PBD}(y)].$$

El valor del parámetro m_r depende del tipo de ruido y de la densidad espectral de potencia (véase el Apéndice A.3.1 para su cálculo). La densidad espectral de potencia del ruido fue siempre $N_0 = 0.5 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$. El control del contraste de la señal y el procedimiento para enmascarar la señal con ruido se puede ver en el Apéndice A.4.2.

Procedimiento

Se realizó un experimento donde se obtuvieron los umbrales de contraste para la detección de una señal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1 \text{ c/gav}$ inserta en ruido paso-banda doble 1D. En el experimento se manipularon las frecuencias centrales ($\nu_{C_{\text{inf}}}$ y $\nu_{C_{\text{sup}}}$) de los dos ruidos paso-banda que componen el ruido paso-banda doble manteniendo la misma densidad espectral de potencia. En particular se establecieron cuatro distancias espectrales (DE, en octavas) entre las frecuencias centrales de los dos ruidos paso-banda $DE \in \{1, 2, 3, 4\}$, donde $DE = \log_2(\nu_{C_{\text{sup}}} / \nu_{C_{\text{inf}}})$. Los valores de las frecuencias centrales de los ruidos paso-banda componentes se fijaron en torno a la frecuencia espacial de la señal. Así por ejemplo, para una distancia espectral de $DE = 2$ octavas, las frecuencias centrales son $\nu_{C_{\text{inf}}} = 0.5 \text{ c/gav}$ y $\nu_{C_{\text{sup}}} = 2 \text{ c/gav}$. Cada umbral es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal. En cada ensayo y en cada presentación se utilizaron muestras de ruido paso-banda doble estático diferentes. Se utilizaron escaleras bayesianas adaptativas para la determinación de los umbrales sensoriales. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos y cada sesión experimental consistió en la obtención de cuatro umbrales (uno por distancia entre frecuencias centrales $\nu_{C_{\text{inf}}}$ y $\nu_{C_{\text{sup}}}$). En total cada sujeto realizó tres sesiones experimentales en diferentes días; la duración de cada sesión fue aproximadamente de veinte minutos.

Resultados y discusión

Los resultados de este experimento para ambos sujetos están representados en la Figura 7.2.6. En los paneles de la columna izquierda están representados los umbrales de contraste (en unidades logarítmicas) para la detección de una señal inserta en ruido paso-banda

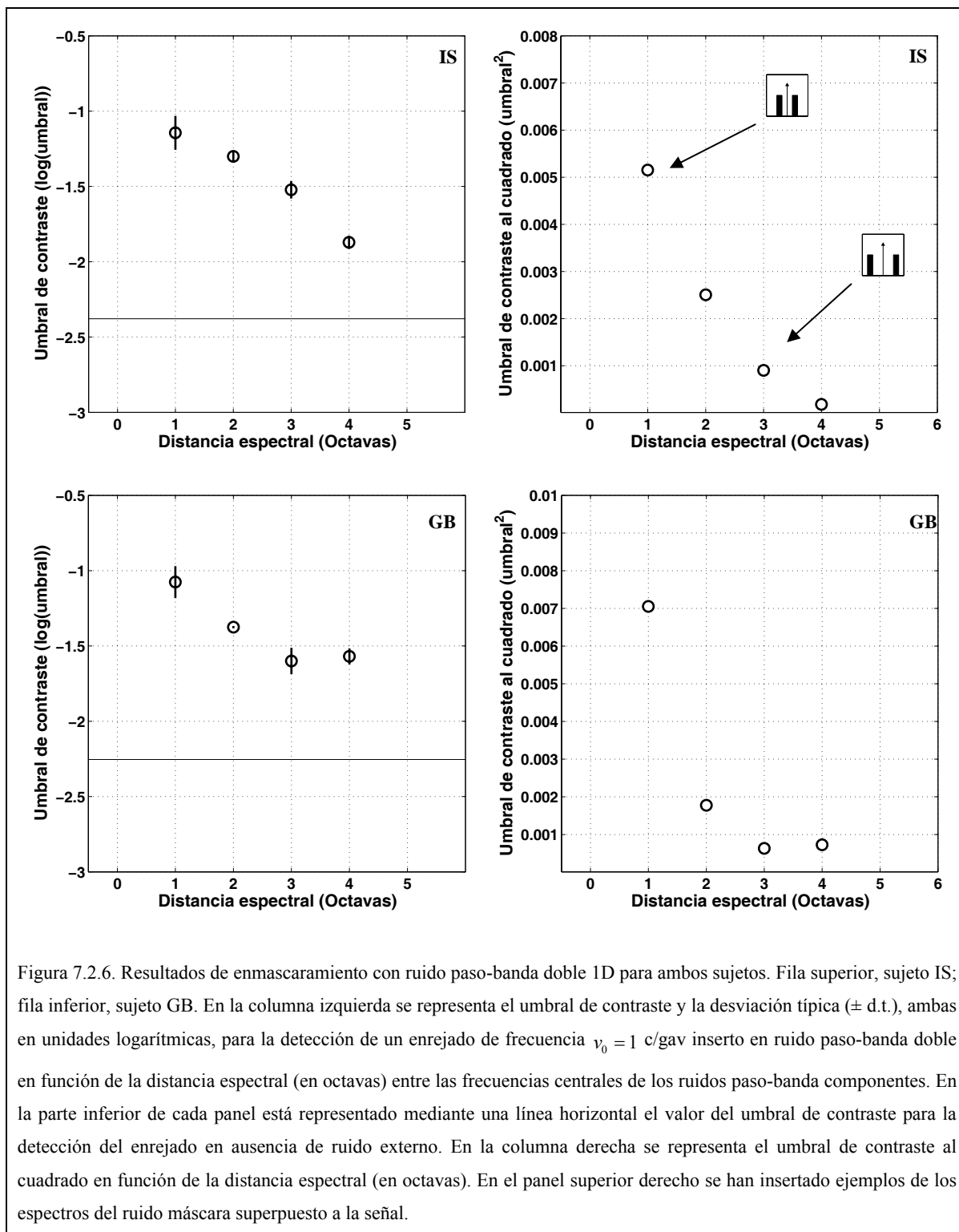


Figura 7.2.6. Resultados de enmascaramiento con ruido paso-banda doble 1D para ambos sujetos. Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa el umbral de contraste y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, para la detección de un enrejado de frecuencia $\nu_0 = 1$ c/gav inserto en ruido paso-banda doble en función de la distancia espectral (en octavas) entre las frecuencias centrales de los ruidos paso-banda componentes. En la parte inferior de cada panel está representado mediante una línea horizontal el valor del umbral de contraste para la detección del enrejado en ausencia de ruido externo. En la columna derecha se representa el umbral de contraste al cuadrado en función de la distancia espectral (en octavas). En el panel superior derecho se han insertado ejemplos de los espectros del ruido máscara superpuesto a la señal.

doble 1D horizontal en función de las distancias espectrales entre las frecuencias centrales de los ruidos paso-banda componentes. En la parte inferior de los dos paneles (columna izquierda) se ha representado mediante una línea horizontal el valor del umbral para la misma señal pero en ausencia de ruido. En los paneles de la columna derecha están representados los mismos umbrales pero en unidades de contraste al cuadrado. Como se puede ver en la Figura 7.2.6, el umbral de detección de la señal decrece con el aumento de la distancia espectral entre los dos ruidos paso-banda. Este resultado también fue obtenido cuando la máscara estaba compuesta por dos sinusoides situados a ambos lados de la frecuencia de la señal (Hutchinson y Ledgeway, 2004, con estímulos de segundo orden en movimiento). Se ha afirmado que el ruido paso-banda doble al igual que el ruido paso-todo con muesca espectral reduce considerablemente el efecto de off-frequency-looking (Perkins y Landy, 1991).

7.3. Ajuste del modelo de enmascaramiento y estimación de sus parámetros

7.3.1. Objetivos

Mediante el modelo de enmascaramiento descrito en el Capítulo 4, se han ajustado los umbrales predichos por este modelo a los umbrales empíricos obtenidos en los experimentos de enmascaramiento. Tres son los objetivos del ajuste del modelo a los datos empíricos. El primero, caracterizar los filtros (o canales) de primer orden, a saber: a) decidir qué forma espectral (asimétrica o simétrica, véase el apartado 4.3 (B)) tienen las FTM-1D de los canales psicofísicos de primer orden; b) determinar las anchuras de banda de estas FTM-1D y su relación con su frecuencia de pico (véase el apartado 4.3 (C)); y c) decidir el modelo de detección (con canal fijo o con canal variable, véase el apartado 4.4) que mejor explica los resultados en los experimentos de enmascaramiento. El segundo, es validar el modelo de enmascaramiento y comprobar su generalidad a partir de los datos obtenidos con el ruido paso-banda 1D (ruido utilizado en los experimentos de enmascaramiento con estímulos de segundo orden), es decir, comprobar hasta que punto el modelo ajustado a los datos obtenidos con este tipo de ruido es capaz de predecir los resultados experimentales obtenidos con los otros tipos de ruido máscara. El tercero, es estudiar el efecto de off-frequency looking para cada tipo de ruido máscara.

7.3.2. Predicciones del modelo de enmascaramiento

Como se ha visto en el Capítulo 4, para poder ajustar las predicciones del modelo de enmascaramiento a los datos empíricos, es necesario conocer: a) la forma funcional para las FTM-1D de los canales psicofísicos; b) un modelo de detección; c) la anchura de banda de las FTM-1D en función de su frecuencia de pico; d) el espectro de potencia del ruido máscara externo; e) la sensibilidad del sujeto; y f) el valor del ruido interno de cualquier canal.

a) Para la forma de la FTM-1D de los canales psicofísicos se han supuesto dos formas posibles, *asimétrica* (función lognormal, véase la ecuación (4.17)) o *simétrica* (módulo de la transformada de Fourier de una función de Gabor, véase la ecuación (4.19)).

b) Para los modelos de detección se han supuesto dos, *modelo de detección de canal fijo* (apartado 4.4 A; véase también ecuación (4.24)), y *modelo de detección de canal variable* (véase el apartado 4.4 B; véase también ecuación (4.1)).

c) La anchura de banda en octavas a la mitad de la FTM-1D y la relación con su frecuencia de pico que vendrá determinada por la ecuación (4.21). Por lo tanto, para conocer la anchura y su relación es necesario estimar los valores de los parámetros B y b de esta ecuación.

d) Cada tipo de ruido máscara externo tiene su espectro de potencia correspondiente (véase el Apéndice 3), y la predicción del modelo enmascaramiento dependerá de éste (véanse el apartado 4.6 y el Apéndice 7).

e) La sensibilidad del sujeto en los experimentos de enmascaramiento viene determinada por el valor del parámetro s del modelo de enmascaramiento (véase la ecuación (4.1)), parámetro que es necesario estimar.

f) Por último, para obtener el valor del ruido interno de un canal k , es necesario conocer el valor de $m_0^2(v_k)$ (véase la ecuación (4.13), véase también el apartado 4.3, A (1)), que es el umbral de contraste al cuadrado para la detección de un enrejado sinusoidal horizontal de frecuencia espacial v_k en ausencia de ruido máscara externo. Por lo tanto, si se desea conocer el ruido interno un canal, es necesario estimar el umbral de contraste para un enrejado de frecuencia espacial igual a la frecuencia de pico del canal. Esta estimación se ha realizado ajustando la función de sensibilidad al contraste (*FSC-ID* con parámetros A y

a , véase la ecuación (4.15)) a la inversa de los umbrales de detección ($1/m_0(v)$) mediante el procedimiento de mínimos cuadrados (véase el Apéndice 9). Los umbrales de detección empíricos ($m_0(v)$) utilizados pertenecen al experimento de linealidad realizado con estímulos de primer orden (enrejados sinusoidales horizontales con ventana gaussiana en ausencia de ruido máscara externo) (véase el apartado 6.2).

En la Tabla 7.1 aparecen, para cada sujeto, los valores de los parámetros estimados A y a de la $FSC-ID$, así como la frecuencia espacial v_{\max} donde la $FSC-ID$ tiene el máximo.

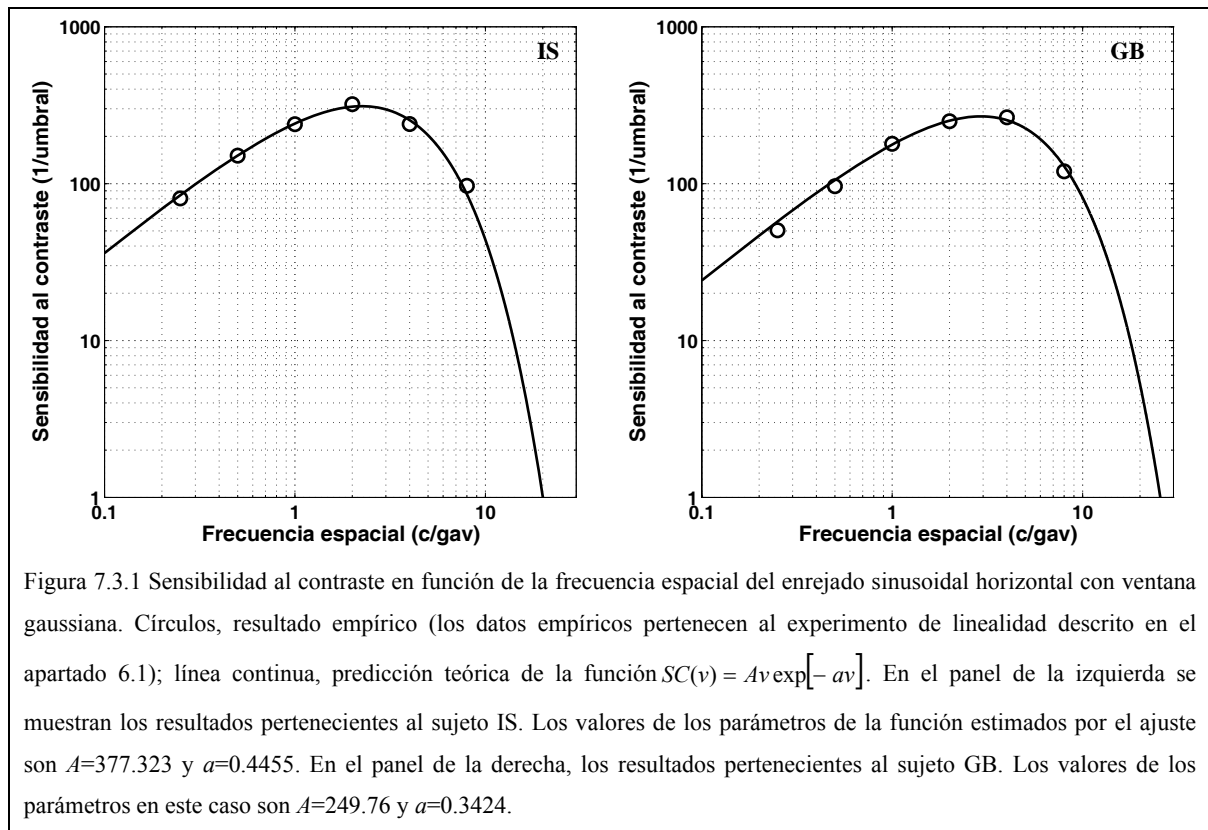
Tabla 7.1

Sujeto	Parámetros de la $FSC-ID$		Máximo de la $FSC-ID$
	A	a	v_{\max} (c/gav)
IS	377.323	0.4455	2.24
GB	249.76	0.3424	2.92

Los ajustes de la $FSC-ID$ para ambos sujetos pueden verse en la Figura 7.3.1. Como se observa, la función ajustada predice la relación entre la sensibilidad al contraste y la frecuencia espacial del enrejado. La agudeza visual (A.V.) teórica para el sujeto IS es aproximadamente $A.V.=20$ c/gav y para el sujeto GB, $A.V.=25$ c/gav, estos datos son similares a los obtenidos por Hess y Nordby (1986; véase Fig. 6, sujeto con visión normal) para el mismo nivel de luminancia ($L_0=15$ cd/m²).

7.3.3. Método

Se han ajustado las predicciones del modelo de enmascaramiento a los umbrales empíricos al cuadrado obtenidos en los experimentos de enmascaramiento. Recuérdese que en total, cada sujeto realizó siete experimentos. Las variables independientes y los parámetros relevantes de la señal y del ruido de cada experimento que han sido utilizados en los ajustes del modelo aparecen en la tabla 7.2.



Como se ha visto en apartado anterior, supuesta una forma para la FTM-1D del canal, un modelo de detección, una forma funcional que relaciona la anchura de banda de la FTM-1D con su frecuencia de pico, conocido el espectro de potencia del ruido máscara con sus parámetros relevantes, y conocido el valor de m_0^2 para cualquier frecuencia espacial, solamente existen tres parámetros libres: B , b y s , cuyo valor hay que estimar para caracterizar el modelo de procesamiento. Por ello, para ajustar el modelo de enmascaramiento a los umbrales empíricos obtenidos en los experimentos sólo se necesitará estimar el valor de esos tres parámetros.

Se realizaron dos tipos de ajuste: por un lado, se ajustó el modelo a los siete experimentos de forma conjunta, y por otro, se ajustó el modelo solamente a los resultados de los dos experimentos con ruido paso-banda y señales de 1 c/gav y 3 c/gav. En este último caso, con los valores estimados se predijeron los resultados obtenidos con los otros tipos de ruido con el fin de mostrar la capacidad predictiva de este modelo de enmascaramiento cuando se utiliza el ruido paso-banda.

Tabla 7.2. Tipos de ruido, variables independientes y parámetros relevantes.		
Tipo de ruido	Variable independiente ^a	Parámetros ^b
Paso-todo	N_0 , desde 0.000976 hasta $0.5 \times 10^{-3} (c/gav)^{-1}$ en múltiplos de 2	$\nu_0 = 1 c/gav$
Paso-bajo	ν_{PB} , desde $0.25 c/gav$ hasta $1 c/gav$ en pasos de media octava	$\nu_0 = 1 c/gav$ $N_0=0.5 \times 10^{-3} (c/gav)^{-1}$
Paso-alto	ν_{PA} , desde $1 c/gav$ hasta $5.65 c/gav$ en pasos de media octava	$\nu_0 = 1 c/gav$ $N_0=0.5 \times 10^{-3} (c/gav)^{-1}$
Con muesca espectral	AEM, en torno a $1 c/gav$, desde 0 hasta 5 octavas en pasos de 1.	$\nu_0 = 1 c/gav$ $N_0=0.5 \times 10^{-3} (c/gav)^{-1}$
Paso-banda	ν_C , desde $0.25 c/gav$ hasta $5.65 c/gav$ para $\nu_0=1 c/gav$ y desde $0.75 c/gav$ hasta $12 c/gav$ para $\nu_0=3 c/gav$ en pasos de media octava.	$\nu_0 = 1 c/gav$ ó $\nu_0 = 3 c/gav$ $N_0=0.5 \times 10^{-3} (c/gav)^{-1}$ $B\nu = 0.5 c/gav$
Paso-banda doble	DE, en torno a $1 c/gav$, desde 0 hasta 5 octavas en pasos de una octava.	$\nu_0 = 1c/gav$ $N_0=0.5 \times 10^{-3} (c/gav)^{-1}$ $B\nu = 0.5 c/gav$

a. ν_{PB} , ν_{PA} , frecuencias de corte inferior y superior respectivamente; AEM, anchura espectral de la muesca ($AEM = \log_2(\nu_{PA}/\nu_{PB})$); ν_C , frecuencia central del ruido; DE, distancia espectral entre las frecuencias centrales de los ruidos paso-banda ($DE = \log_2(\nu_{Csup}/\nu_{Cinf})$). b. $B\nu$, anchura espectral del ruido.

En total para cada sujeto se realizaron ajustes para ocho condiciones diferentes, resultado factorial de combinar 2 tipos de ajuste (todos o paso-banda 1 y 3 c/gav) \times 2 formas del canal (asimétrico o simétrico) \times 2 modelos de detección (canal fijo o canal variable).

Para realizar los ajustes se diseñó un algoritmo iterativo programado en MATLAB que se ejecutó en un ordenador portátil COMPAQ Pentium (R) IV a 2.66 GHz. El propósito de este algoritmo fue estimar los valores B , b , y s de modo que la suma de los errores (residuos) al cuadrado (SSE) entre los umbrales empíricos y los umbrales predichos por el modelo fuese mínima. En lo que sigue se describe detalladamente el algoritmo que realiza ese ajuste en un caso particular.

Sea por ejemplo la forma del canal asimétrica y sea el modelo de detección de canal fijo. Una iteración cualquiera consta de los siguientes pasos:

- 1) Se parte de una terna de valores B , b , y s .
- 2) Se calcula Boct a partir de la ecuación (4.21) para frecuencias espaciales de pico de la FTM-1D de los canales desde 0.01 c/gav hasta 16 c/gav, en pasos de 0.01 c/gav.
- 3) Se calcula α para cada frecuencia de pico mediante la ecuación (4.22).
- 4) Se identifica ν_k (frecuencia de pico de la FTM-1D) con ν_0 (frecuencia espacial de la señal), por lo que solamente se utiliza el valor de $\text{Boct}(\nu_k)$ y $\alpha(\nu_k)$.
- 5) Se calcula simultáneamente para todos los experimentos (alternativamente para dos experimentos) el umbral predicho para cada estímulo, para cada tipo de ruido y para la variable independiente pertinente para ese tipo de ruido (véase la Tabla 7.2). Cada umbral predicho se calcula evaluando (para el canal fijo) la ecuación (4.24) e implementando las integrales correspondientes (véanse las ecuaciones (A.7.1) y (A.7.2)) para cada tipo de ruido máscara (véase el Apéndice A.7.2).
- 6) Se calcula SSE (véase el Apéndice 9).

Mediante el método iterativo de minimización Nelder-Mead (Nelder y Mead, 1965), se van generando nuevas ternas de valores B , b , y s de tal modo que el valor para SSE sea mínimo. Los valores de inicio de la terna no cambiaron el resultado final del ajuste.

En el caso del modelo de detección con canal variable, el ajuste se complica, ya que, aunque los pasos son idénticos a los dados en el modelo de detección de canal fijo, en el paso 4 hay que estimar el valor de ν_k que maximiza la razón señal/ruido para cada

experimento, tipo de ruido y valor de la variable independiente (procedimiento que se explica detalladamente en el Apéndice 10).

7.3.4. Resultados

7.3.4.1. Caracterización de la FTM-1D de los canales de primer orden

En la Tabla 7.3 se presentan, para cada sujeto, los resultados de los ajustes del modelo de enmascaramiento en las ocho condiciones mencionadas. De izquierda a derecha, cada columna representa el sujeto (IS o GB), el tipo de ajuste (todos o paso-banda 1 y 3 c/gav), la forma del canal (asimétrica o simétrica), el modelo de detección (canal fijo o canal variable), los valores estimados de los parámetros relativos a la sensibilidad del sistema (s) y a la anchura de banda de las FTM-1D (B y b), las anchuras de banda en octavas de las FTM-1D centradas en 1 y 3 c/gav, y la última columna corresponde a la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado (Root Mean Square Error) en unidades logarítmicas ($\log_{10}(\text{RMSE})$), véase el Apéndice 9).

Tabla 7.3. Resultados de los ajustes del modelo de enmascaramiento									
Suj.	Tipo de ajuste	Forma del canal	Modelo de detección	s	B	b	Boct 1 c/gav	Boct 3 c/gav	$\log_{10}(\text{RMSE})$ del ajuste
IS	Todos los experimentos	Asimétrica	Fijo	0.3633	4.4371	0.5162	2.14	0.73	-3.320
			Variable	0.3560	3.2457	1.1324	2.32	1.29	-3.491
		Simétrica	Fijo	0.3057	4.9366	0.4138	2.22	0.65	-3.182
			Variable	0.3303	7.6535	0.4097	3.22	0.79	-3.260
	Paso-banda 1 y 3 c/gav	Asimétrica	Fijo	0.2776	0.3417	0.6447	0.77	0.66	-3.555(-2.880)
			Variable	0.3260	2.8636	0.9513	2.00	1.09	-3.521(-3.390)
		Simétrica	Fijo	0.2660	0.1938	0.5954	0.66	0.60	-3.499(-2.850)
			Variable	0.3207	2.5734	0.7281	1.67	0.85	-3.385(-3.033)
GB	Todos los experimentos	Asimétrica	Fijo	0.1753	2.8272	0.5949	1.63	0.73	-3.077
			Variable	0.2062	4.6957	0.2309	1.95	0.46	-2.948
		Simétrica	Fijo	0.1562	2.9718	0.5280	1.62	0.67	-2.979
			Variable	0.1554	1.7664	1.0414	1.69	1.12	-2.839
	Paso-banda 1 y 3 c/gav	Asimétrica	Fijo	0.1269	1.9931	0.5558	1.28	0.65	-3.214(-3.025)
			Variable	0.1283	3.3590	0.9130	2.14	1.08	-3.113(-2.590)
		Simétrica	Fijo	0.1269	2.1337	0.5063	1.29	0.61	-3.120(-2.963)
			Variable	0.1333	9.0827	0.5667	3.90	1.01	-2.981(-2.511)

Nótese que un valor pequeño para $\log_{10}(\text{RMSE})$ denota que el ajuste es más preciso. Cuando se ha ajustado el modelo de enmascaramiento sólo a los dos experimentos paso-banda, en la columna para $\log_{10}(\text{RMSE})$ aparecen dos valores: el primer valor corresponde al ajuste a los dos experimentos; y el segundo valor (entre paréntesis), corresponde al $\log_{10}(\text{RMSE})$ del ajuste del modelo a todos los experimentos con los parámetros estimados con el ruido paso-banda. La Figura 7.3.2 sintetiza gráficamente los resultados de la Tabla 7.3 para los ajustes a todos los experimentos. En la Figura 7.3.3 se representa la anchura de banda total en octavas a la mitad de la FTM del canal en función de su frecuencia de pico. En las Figuras desde la 7.3.4 hasta la 7.3.11 (final del capítulo) se representan gráficamente los ocho ajustes del modelo de enmascaramiento para cada sujeto.

Cuando el ajuste se realiza a todos los experimentos se observa que para ambos sujetos la forma de la FTM-1D de los canales que mejor se ajusta a los datos de enmascaramiento es la forma asimétrica (función lognormal) con independencia del modelo de detección (véase la Figura 7.3.2 y véanse con detalle las Figuras desde 7.3.4 hasta 7.3.7). Además en la Figura 7.3.2 se observa que el modelo de detección que mejor se ajusta a los datos del sujeto IS es la de canal variable, mientras que el modelo de detección para el sujeto GB es el de canal fijo. Para estas condiciones óptimas, en la Figura 7.3.3 se han representado las anchuras de banda en octavas de las FTM-1D en función de su frecuencia de pico, utilizando la ecuación (4.21) y con los parámetros estimados (B y b) (línea continua). Como se observa, éstas decrecen con el aumento de la frecuencia de pico del canal. Aunque no se muestra gráficamente, las anchuras de banda estimadas con el modelo de canal fijo son siempre inferiores a las obtenidas con el modelo de canal variable (véase con detalle la Tabla 7.3). Finalmente, con respecto a la sensibilidad, se observa que ésta es mayor para el sujeto IS que para el sujeto GB (véanse los valores del parámetro s en la Tabla 7.3).

7.3.4.2. Potencia explicativa del modelo de enmascaramiento utilizando ruido máscara paso-banda 1D

Cuando el ajuste se realiza a los experimentos paso-banda 1 y 3 c/gav (véanse las Figuras desde 7.3.8 hasta 7.3.11), para el sujeto GB las conclusiones son similares a las obtenidas

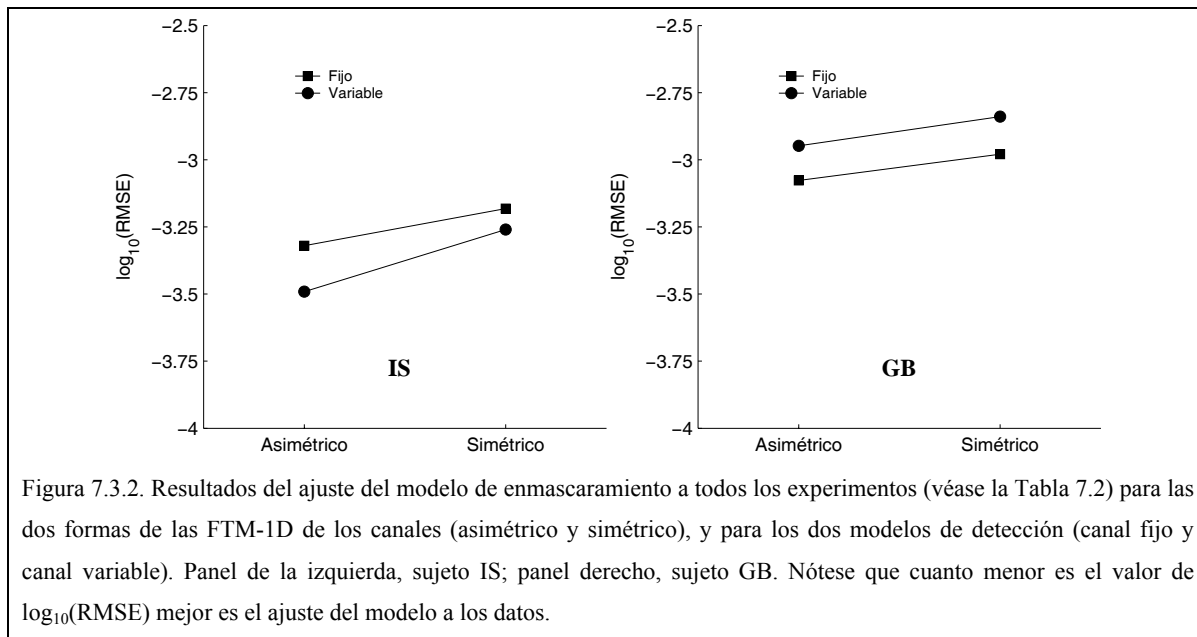


Figura 7.3.2. Resultados del ajuste del modelo de enmascaramiento a todos los experimentos (véase la Tabla 7.2) para las dos formas de las FTM-1D de los canales (asimétrico y simétrico), y para los dos modelos de detección (canal fijo y canal variable). Panel de la izquierda, sujeto IS; panel derecho, sujeto GB. Nótese que cuanto menor es el valor de $\log_{10}(\text{RMSE})$ mejor es el ajuste del modelo a los datos.

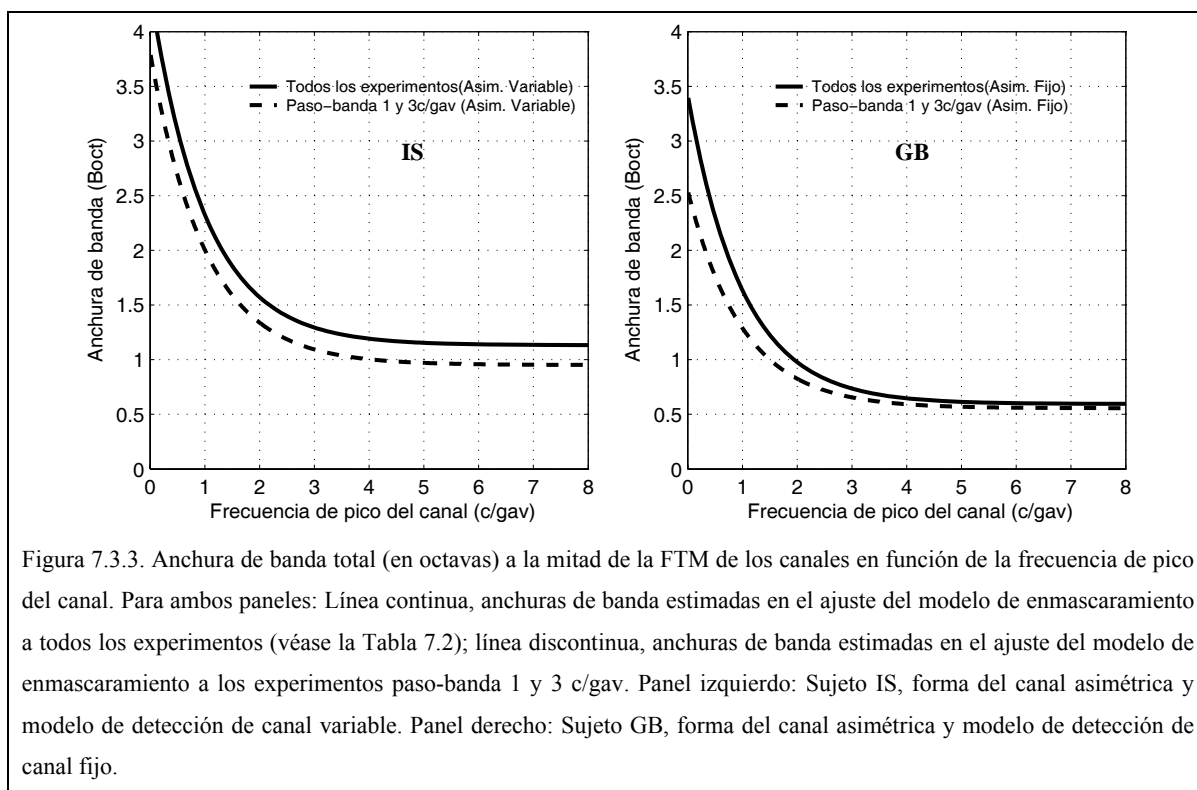


Figura 7.3.3. Ancho de banda total (en octavas) a la mitad de la FTM de los canales en función de la frecuencia de pico del canal. Para ambos paneles: Línea continua, anchuras de banda estimadas en el ajuste del modelo de enmascaramiento a todos los experimentos (véase la Tabla 7.2); línea discontinua, anchuras de banda estimadas en el ajuste del modelo de enmascaramiento a los experimentos paso-banda 1 y 3c/gav. Panel izquierdo: Sujeto IS, forma del canal asimétrica y modelo de detección de canal variable. Panel derecho: Sujeto GB, forma del canal asimétrica y modelo de detección de canal fijo.

teniendo en cuenta todos los experimentos: la forma de la FTM-1D que mejor se ajusta es la asimétrica y el modelo de detección es el de canal fijo. Además, a partir de los

parámetros estimados con ese ruido se pueden predecir de modo consistente los resultados obtenidos con el resto de los tipos de ruido. Para el sujeto IS, la forma del canal sigue siendo asimétrica, pero, respecto al modelo de detección, el ajuste es un poco mejor para canal fijo que para canal variable. Sin embargo, que el segundo valor de $\log_{10}(\text{RMSE})$ sea alto, muestra que el ajuste al resto de los experimentos (suponiendo un modelo de canal fijo), no es bueno (véanse las Figuras 7.3.8 y 7.3.10). Nótese que para este sujeto, la condición de canal asimétrico variable muestra un buen ajuste tanto a los dos experimentos con ruido paso-banda como a todos los experimentos. Por lo tanto, los datos del experimento paso-banda 1 y 3 c/gav se podrían estimar plausiblemente los parámetros del modelo de procesamiento ya que las predicciones del modelo de enmascaramiento con estos parámetros se ajustan bastante bien a los datos de los otros experimentos de enmascaramiento (véase sujeto IS, Figura 7.3.9; sujeto GB, Figura 7.3.8). Este resultado es importante para generalizar los resultados obtenidos con ruido paso-banda, ya que, como se ha repetido y se estudia en Capítulo 8, para obtener la forma de las FTM-1D de segundo orden se ha utilizado solamente ese tipo de ruido. Por último, respecto a las anchuras de banda, éstas también decrecen con el aumento de la frecuencia de pico. Sin embargo, las anchuras de banda estimadas con el ajuste a la condición paso-banda 1 y 3 c/gav son algo inferiores para todas las frecuencias de pico a las obtenidas con el ajuste a todos los experimentos. En la Figura 7.3.3 también se han representado (en la condición paso-banda 1 y 3 c/gav) las anchuras de banda en octavas de las FTM-1D en función de su frecuencia de pico, utilizando la ecuación (4.21) y con los parámetros estimados (B y b) (línea discontinua). Como se puede ver, los resultados son similares en la condición óptima para cada sujeto.

7.3.4.3. El efecto de off-frequency looking para cada tipo de ruido

En las Figuras 7.3.12 y 7.3.13 se muestran los ajustes del modelo de enmascaramiento para el sujeto IS en las condiciones canal asimétrico variable y canal simétrico variable cuando se realizó el ajuste a todos los experimentos. El modelo de enmascaramiento en ambas condiciones supone que la detección de la señal inserta en ruido se produce por el canal que maximiza la razón señal/ruido (efecto de off frequency looking). En los paneles de las

filas segunda y cuarta de ambas figuras están representadas mediante círculos azules las frecuencias de pico de los canales que maximizan la razón señal/ruido (véase el proceso para la obtención de estas frecuencias de pico en el Apéndice 10). En estos paneles mediante una línea negra se representa la frecuencia espacial de la señal. Para facilitar la interpretación de esta figura, nótese que cuando el círculo azul está próximo a esta línea, la frecuencia de pico del canal que maximiza la razón señal/ruido está próxima a la frecuencia espacial de la señal. Como se observa en ambas figuras, el efecto de off-frequency-looking depende tanto del tipo de ruido máscara como de la forma de la FTM-1D. Los resultados de los ajustes muestran que hay tipos de ruido máscara que evitan más que otros la detección de una señal por canales con frecuencias espaciales de pico mayores o menores que la de la señal. En la Figura 7.3.12 (canal asimétrico variable) se observa que ninguno de los tipos de ruido utilizados elimina completamente el efecto de off-frequency-looking. Sin embargo, los ruidos con muesca espectral y paso-banda doble atenúan ese efecto de acuerdo con lo sugerido por Patterson (1976) y Perkins y Landy, (1991, fig. 4), respectivamente. En consecuencia con esos dos tipos de ruido, como con el ruido paso-todo, se obtienen predicciones similares a las del modelo de detección de canal fijo. Con los otros tipos de ruido máscara (paso-banda, paso-bajo y paso-alto) el efecto de off-frequency-looking es muy ostensible, existiendo diferencias en las predicciones suponiendo uno u otro modelo de detección.

En la Figura 7.3.13 (canal simétrico variable), sólo en el caso de ruido blanco (véase el primer panel de la segunda fila) la frecuencia de pico de los canales responsables de la detección se aproxima a la frecuencia espacial de la señal. Si embargo los ruidos con muesca espectral y paso-banda doble con forma espectral asimétrica (en escala lineal respecto a la frecuencia espacial de la señal) no atenúan ese efecto en esta condición. Estos resultados muestran que, como se dijo anteriormente, para eliminar el efecto del off-frequency looking es necesario que la forma (simétrica o asimétrica) de la muesca espectral y del espectro del ruido paso-banda doble coincida con la forma (simétrica o asimétrica) de la FTM del canal.

7.4. Discusión general

En lo que sigue se discuten los resultados obtenidos a partir de los experimentos de enmascaramiento con estímulos de primer orden:

a) *Caracterización de la FTM-1D de los canales de primer orden*

Estudios previos, utilizando ruido paso-bajo y paso-alto, han mostrado que existe asimetría en el enmascaramiento cuando los umbrales se representan en escala log-log, concluyendo entonces directamente que la forma del canal es asimétrica en esa escala (Legge y Foley, 1980; Henning et al., 1981; Losada y Mullen, 1995). Esta asimetría en el enmascaramiento, utilizando el mismo tipo de ruido, ha sido obtenida por otros autores (Solomon, 2000; Talgar, Pelli y Carrasco, 2004); en la interpretación de sus resultados utilizaron una función simétrica en escala logarítmica y no realizaron ajustes con otras formas para la FTM. Nuestros resultados de enmascaramiento con ruido paso-alto y paso-bajo (véase la Figura 7.2.2) también muestran que existe asimetría en el enmascaramiento cuando los resultados se representan en escala logarítmica. Sin embargo, es sólo mediante el procedimiento de ajuste utilizado dentro del modelo de enmascaramiento como puede confirmarse que la forma asimétrica (función lognormal) en escala lineal (simétrica en escala logarítmica) de la FTM-1D es la que mejor predice los resultados de todos los experimentos de enmascaramiento para cualquier tipo de ruido.

Respecto a la relación entre la anchura de banda de los canales y la frecuencia de pico de éstos, Losada y Mullen (1995), comparando los umbrales de enmascaramiento con ruido blanco y ruido $1/f$, concluyen que la anchura de banda de los canales es constante en octavas. Sin embargo, en este trabajo se ha encontrado que la anchura de banda en octavas de la FTM-1D decrece con el aumento de su frecuencia de pico. Este resultado concuerda con el obtenido en experimentos psicofísicos previos (Wilson et al., 1983; Solomon, 2000) y con resultados obtenidos en experimentos fisiológicos (De Valois et al., 1982).

Respecto a los valores particulares de las anchuras de banda de las FTM-1D, los resultados de este trabajo (véase la Tabla 7.3) están dentro del rango de los obtenidos por otros autores, como puede verse en la Tabla 7.4. En ella aparecen resumidos los resultados de algunas investigaciones en las que se utilizó el mismo procedimiento experimental de enmascaramiento utilizado en esta Tesis.

En nuestro caso, la estimación de la anchura de banda de los canales depende del modelo de detección adoptado (canal fijo o canal variable) al igual que sucede en Solomon (2000). Sin embargo, en Solomon (2000), al contrario de lo que sucede en este trabajo, las anchuras de banda estimadas con el modelo de canal fijo son superiores a las estimadas con el canal variable. Nuestros resultados obtenidos con el modelo de enmascaramiento apoyan la argumentación de Patterson (1976) en audición contraria a los resultados de Solomon (2000). Una posible causa de las diferencias entre los resultados de Solomon (2000) y los nuestros es que en sus estímulos (funciones de Gabor), la ventana gaussiana del enrejado sinusoidal es inversamente proporcional a la frecuencia espacial del enrejado, por lo que la potencia de la señal depende de la frecuencia espacial y decrece con ésta. Esto podría explicar por qué su *FSC-ID* tiene forma paso-bajo (diferente a la forma paso-banda obtenida en este trabajo, véase la Figura 7.3.1). Otra posible causa es que,

Tabla 7.4			
Autores	Máscara	Señal (vertical)	Anchura de banda de la FTM-1D a la mitad de la función
Stromeyer y Julesz (1972)	Ruido blanco filtrado paso-alto y paso-bajo de igual cRMS (distinto Nivel)	Enrejados sinusoidales de frecuencias 2.5 - 10 c/gav	Entre 1 y 1.5 octavas
Legge y Foley (1980)	Enrejados sinusoidales	Enrejado sinusoidal de frecuencia 2 c/gav	1.75 octavas
Henning et al. (1981)	Ruido blanco filtrado paso-alto y paso-bajo de igual Nivel	Enrejados sinusoidales de frecuencias 1 y 3 c/gav	1.7 y 1.5 octavas respectivamente
Wilson et al. (1983)	Enrejados sinusoidales orientados a 14.5° respecto al test.	Derivada sexta de una función gaussiana de frecuencias 0.75 -16 c/gav	Desde 2.5 hasta 1.3 octavas
Losada y Mullen (1995)	Ruido $1/f$ con muesca espectral de igual Nivel	Enrejado sinusoidal de frecuencia 0.5 c/gav	1.3 octavas
Solomon (2000)	Ruido blanco filtrado paso-alto y paso-bajo de igual Nivel	Enrejados sinusoidales de frecuencias 0.125 - 16 c/gav	Anchura de la (FTM-1D) ² Desde 4.46 hasta 1.63 octavas (canal fijo). Desde 3.29 hasta 0.13 octavas (canal variable).

aunque la potencia de sus estímulos dependen de la ventana gaussiana (al contrario de nuestro caso, por lo menos en las frecuencias espaciales utilizadas, véase el Apéndice A.4.3), en los ajustes del modelo de enmascaramiento prescinde ella.

Respecto al modelo de detección, el de canal variable es el que mejor explica los resultados obtenidos por el sujeto IS, mientras que el modelo de canal fijo es el que mejor predice los resultados del sujeto GB. Una explicación plausible de esta diferencia puede tener que ver con la diferente experiencia en experimentos de determinación de umbrales sensoriales (Pelli, 1981). En efecto, Pelli (1981), muestra que, cuando se utiliza ruido máscara paso-alto y paso-bajo en tareas de detección, se reducen los umbrales con la práctica, aunque esto no ocurre cuando se utiliza ruido paso-todo o de banda ancha. Este resultado lo achacó a la existencia del efecto de off-frequency looking. Por lo tanto, según este autor este efecto aumenta con la experiencia. En nuestro, caso el sujeto IS tiene mayor práctica en experimentos de detección, y en consecuencia, el modelo que mejor explica sus resultados es el de canal variable, mientras que el sujeto GB era la primera vez que participaba en experimentos de determinación de umbrales en tareas de enmascaramiento.

b) Potencia explicativa del modelo de enmascaramiento

Como se ha visto en el apartado 7.3.4.2, con los valores de los parámetros estimados mediante el modelo de enmascaramiento en los experimentos con ruido paso-banda, se podrían predecir (en la mayoría de los casos) los umbrales obtenidos con los otros tipos de ruidos. Esta potencia explicativa del modelo es fundamental en este trabajo, ya que a la hora de estudiar los filtros de la segunda etapa, solamente se utilizará ruido paso-banda.

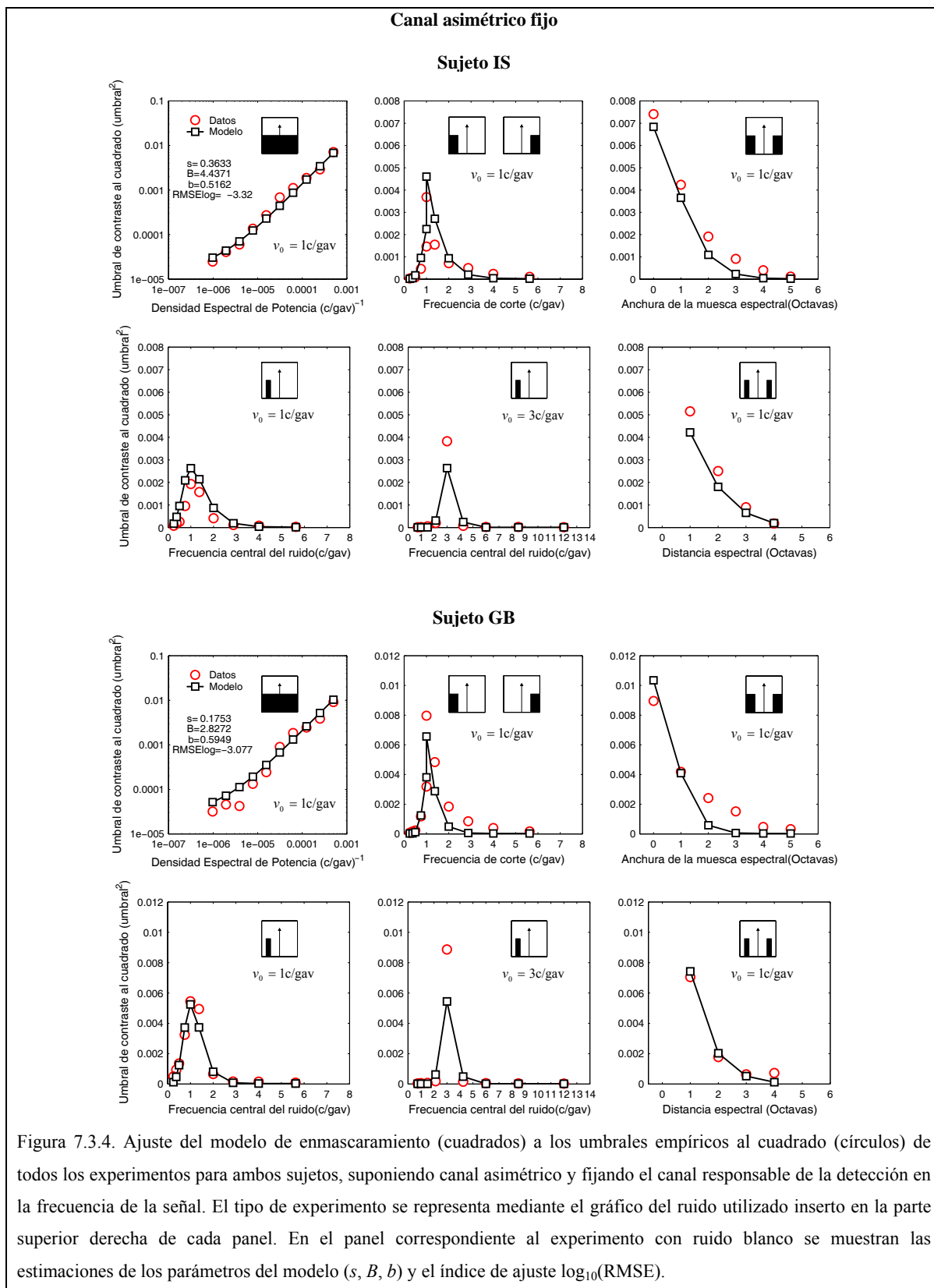
c) El efecto de off-frequency looking para cada tipo de ruido

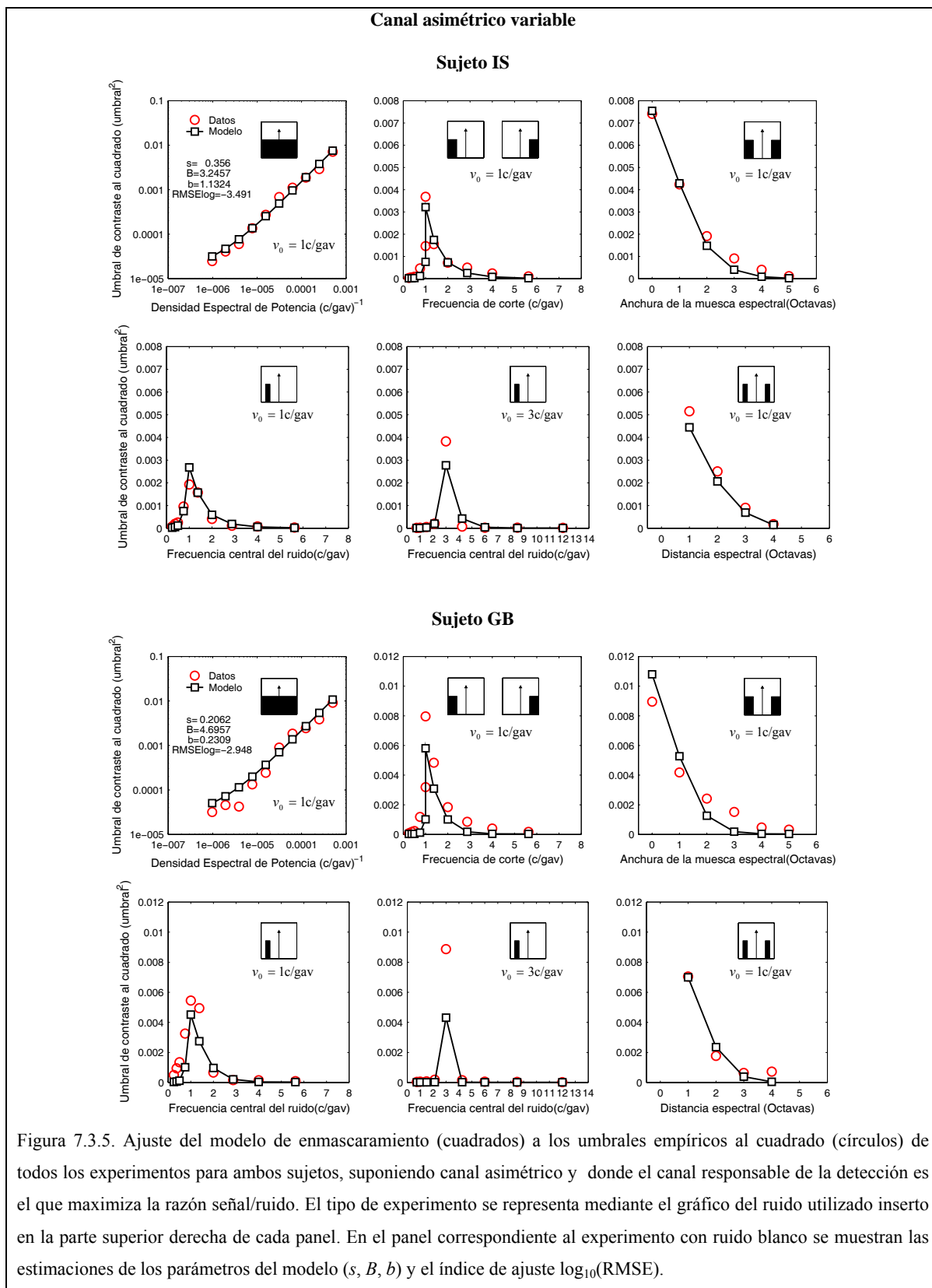
Como se ha visto en el apartado 7.3.4.3, el efecto de off-frequency looking depende de la forma de la FTM-1D supuesta y del tipo de ruido máscara utilizado. También se ha mostrado, una vez más, que utilizar ruido blanco con muestra espectral o ruido paso-banda doble, ruidos habitualmente utilizados para eliminar el problema del efecto de off-frequency looking, no lo eliminan cuando la forma para la FTM del canal es diferente a la forma (simétrica o asimétrica) del espectro estos ruidos. Por último, el resto de ruidos utilizados no eliminan este problema con independencia de la forma supuesta para la FTM

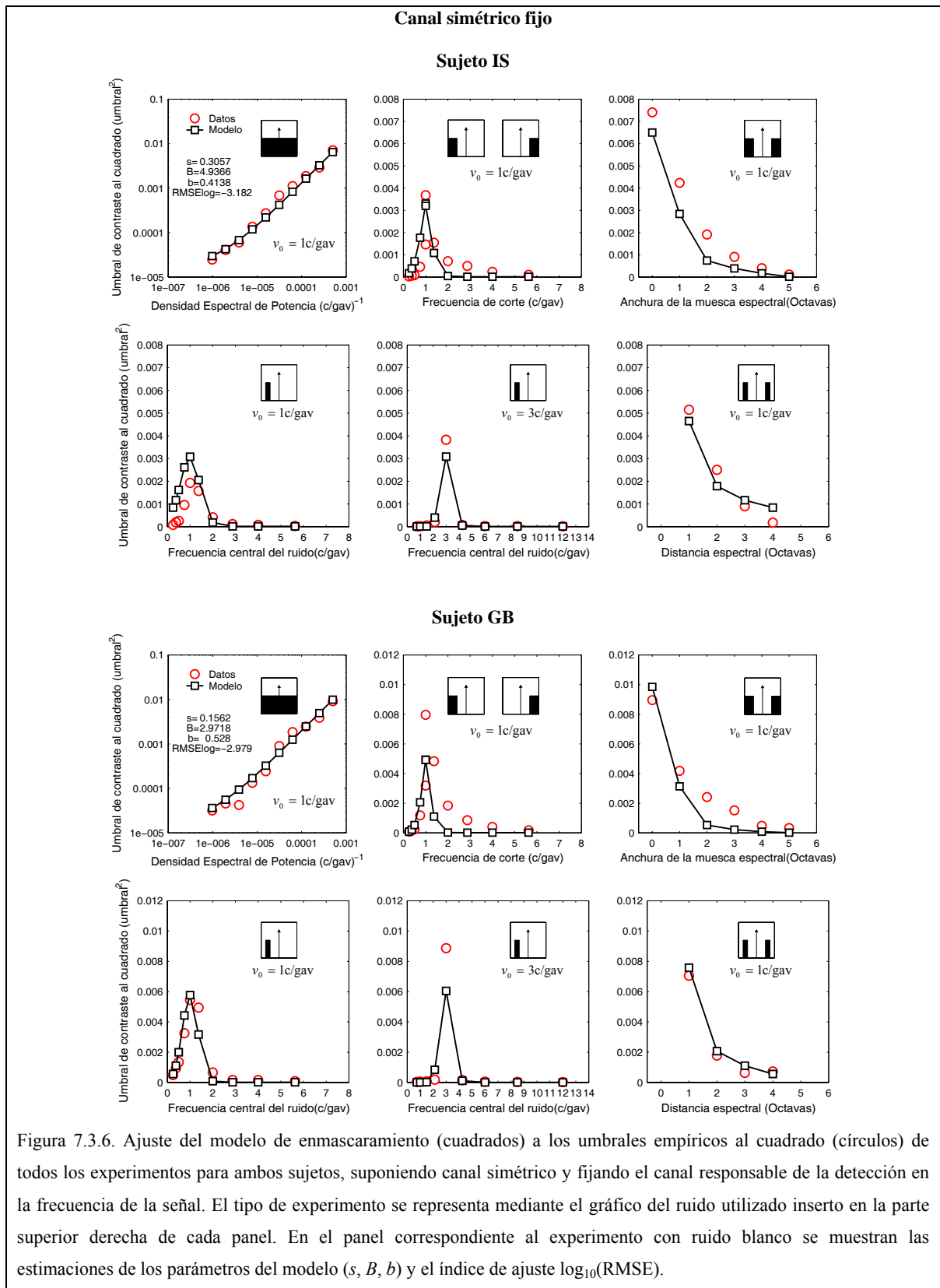
del canal, por lo que no tener en cuenta éste fenómeno puede hacer que los datos obtenidos en los experimentos de enmascaramiento sean interpretados de modo erróneo.

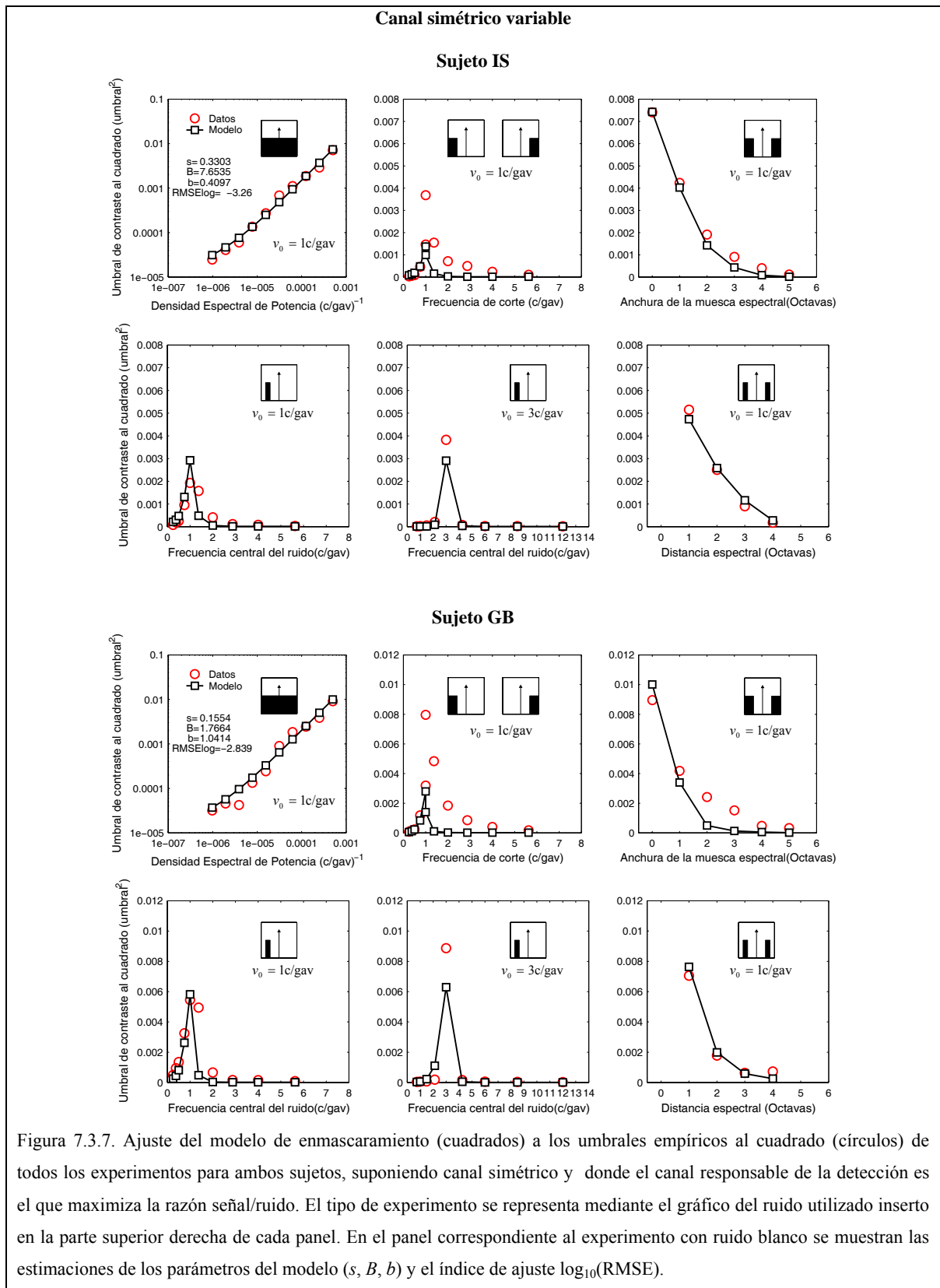
d) *Validación del modelo de enmascaramiento*

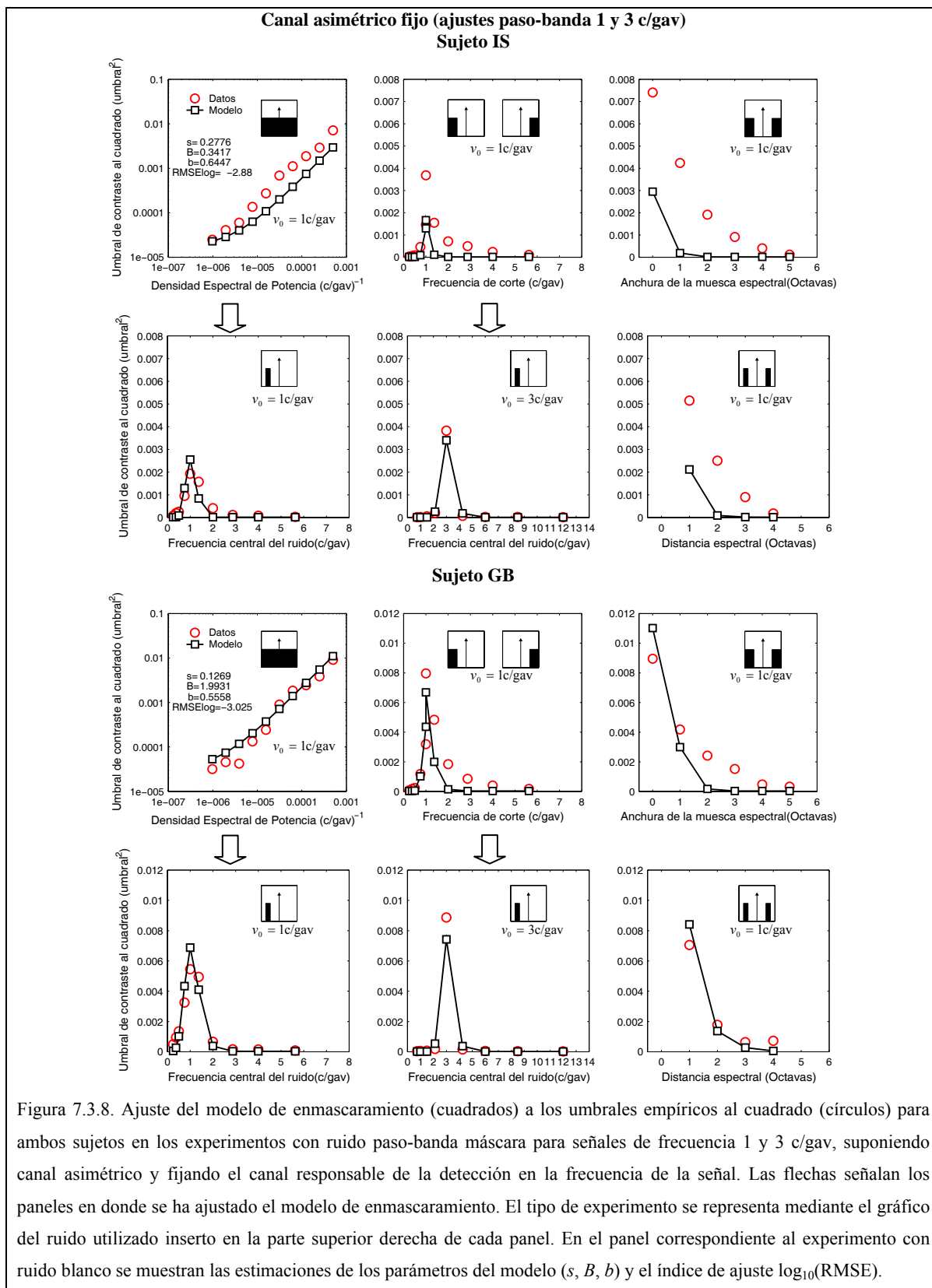
Como se ha visto en el apartado 7.3.4.1 y se ha indicado en ésta discusión general (apartado 7.4 (a)), la similitud de resultados experimentales obtenidos por otros autores utilizando los mismos tipos de ruido, con los resultados obtenidos en esta Tesis, validan el modelo de enmascaramiento utilizado. De modo que puede utilizarse con confianza para estimar las características de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden.











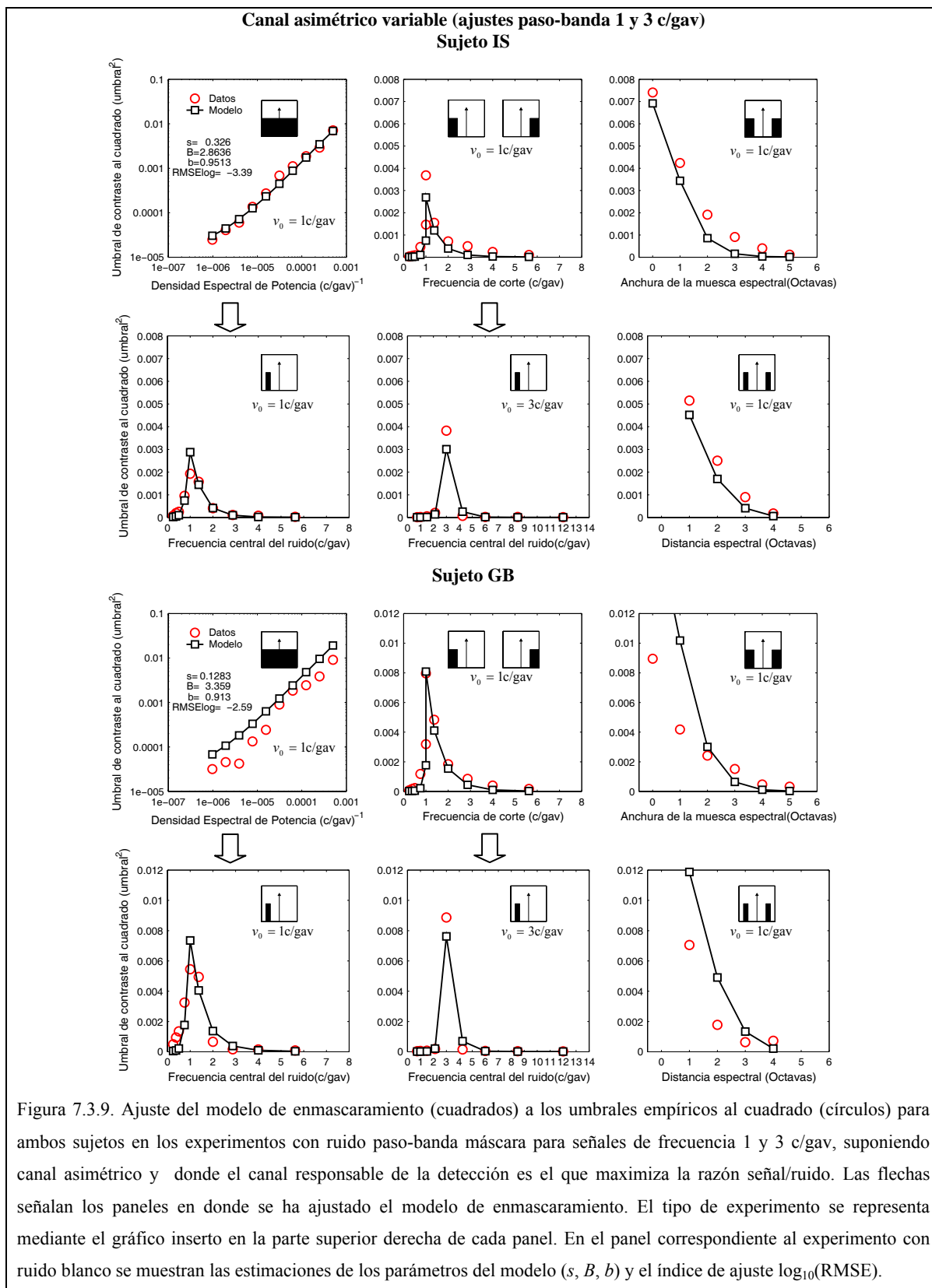
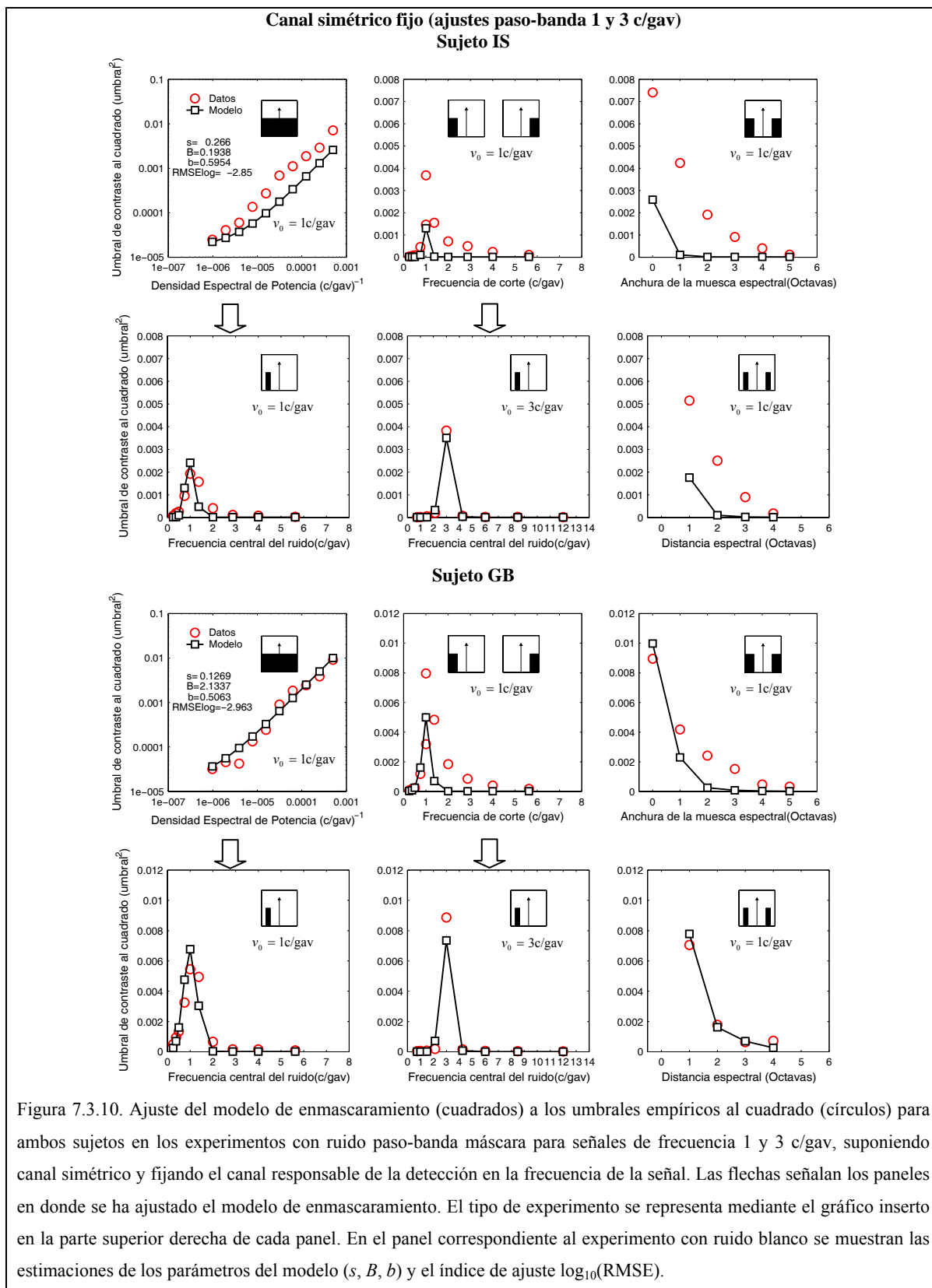
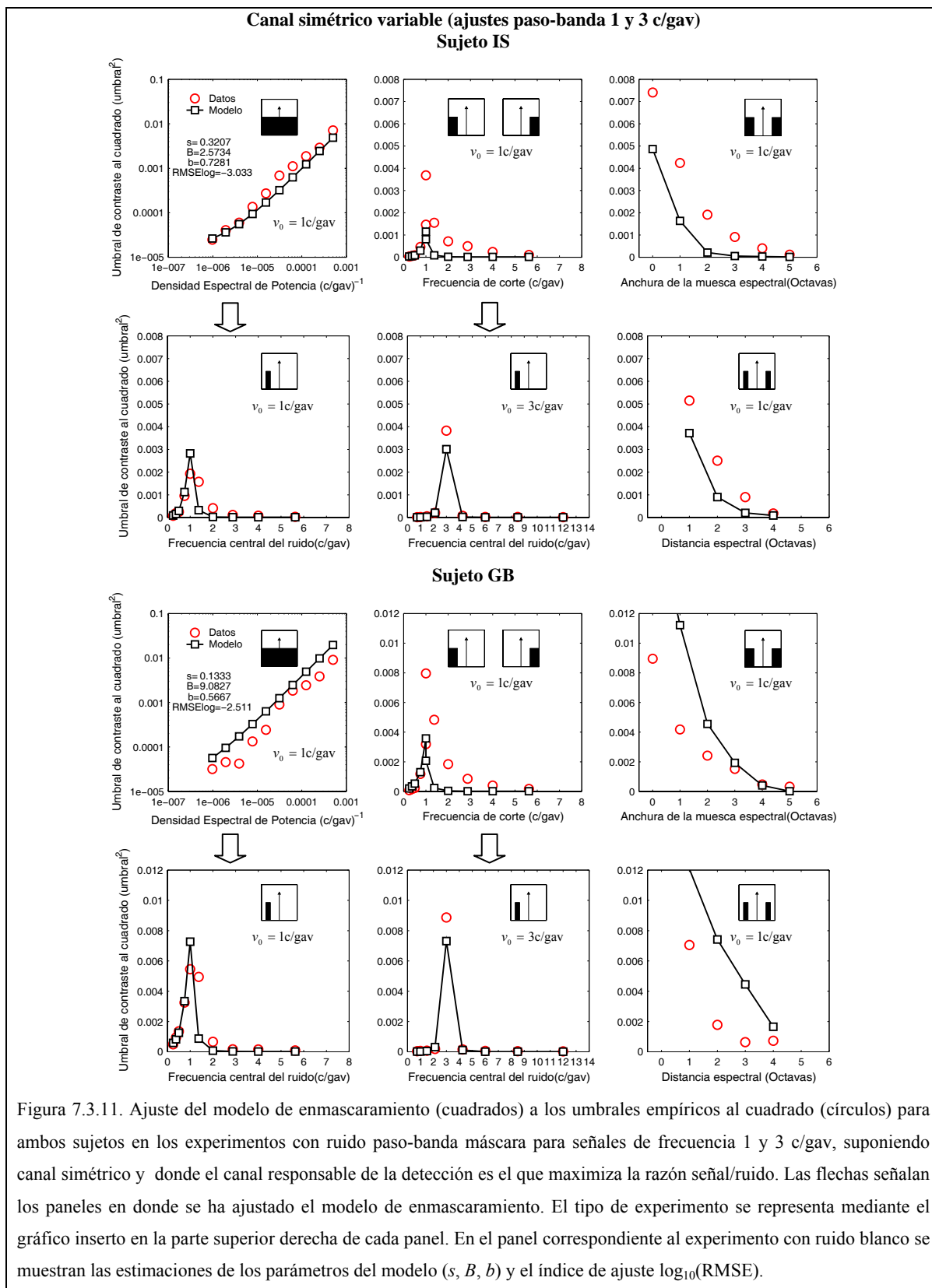


Figura 7.3.9. Ajuste del modelo de enmascaramiento (cuadrados) a los umbrales empíricos al cuadrado (círculos) para ambos sujetos en los experimentos con ruido paso-banda máscara para señales de frecuencia 1 y 3 c/gav, suponiendo canal asimétrico y donde el canal responsable de la detección es el que maximiza la razón señal/ruido. Las flechas señalan los paneles en donde se ha ajustado el modelo de enmascaramiento. El tipo de experimento se representa mediante el gráfico inserto en la parte superior derecha de cada panel. En el panel correspondiente al experimento con ruido blanco se muestran las estimaciones de los parámetros del modelo (s, B, b) y el índice de ajuste $\log_{10}(RMSE)$.





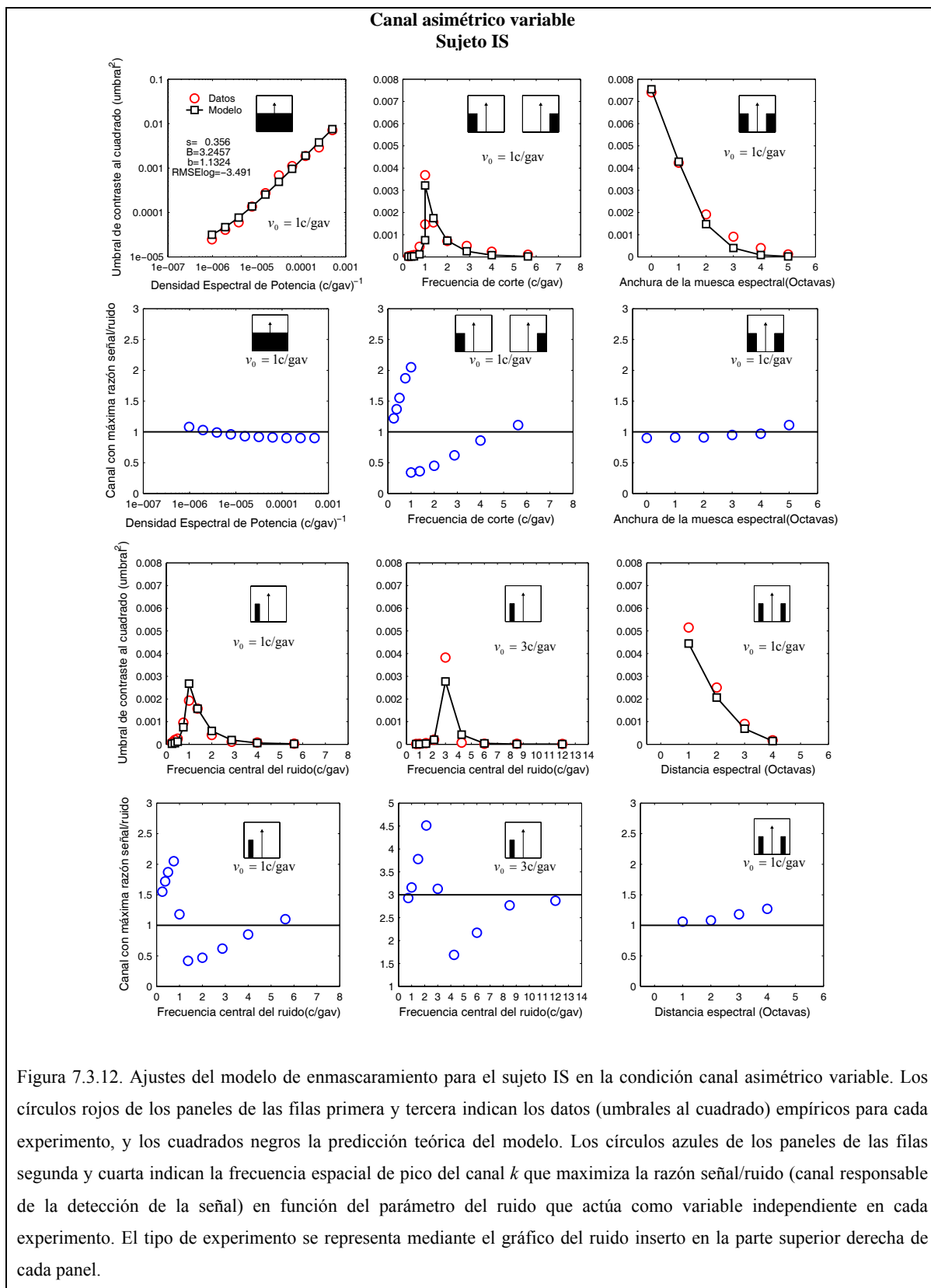


Figura 7.3.12. Ajustes del modelo de enmascaramiento para el sujeto IS en la condición canal asimétrico variable. Los círculos rojos de los paneles de las filas primera y tercera indican los datos (umbrales al cuadrado) empíricos para cada experimento, y los cuadrados negros la predicción teórica del modelo. Los círculos azules de los paneles de las filas segunda y cuarta indican la frecuencia espacial de pico del canal k que maximiza la razón señal/ruido (canal responsable de la detección de la señal) en función del parámetro del ruido que actúa como variable independiente en cada experimento. El tipo de experimento se representa mediante el gráfico del ruido inserto en la parte superior derecha de cada panel.

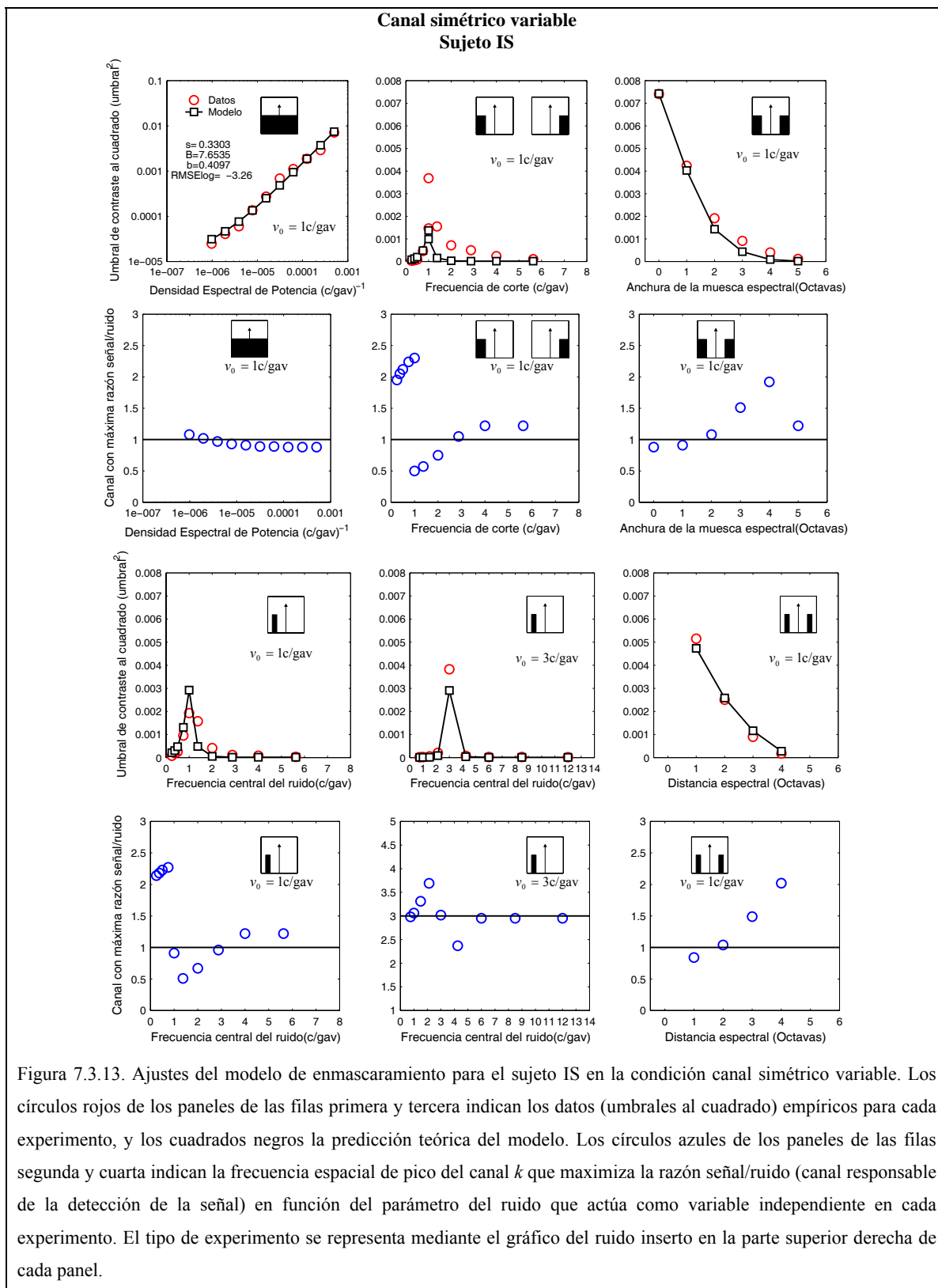


Figura 7.3.13. Ajustes del modelo de enmascaramiento para el sujeto IS en la condición canal simétrico variable. Los círculos rojos de los paneles de las filas primera y tercera indican los datos (umbrales al cuadrado) empíricos para cada experimento, y los cuadrados negros la predicción teórica del modelo. Los círculos azules de los paneles de las filas segunda y cuarta indican la frecuencia espacial de pico del canal k que maximiza la razón señal/ruido (canal responsable de la detección de la señal) en función del parámetro del ruido que actúa como variable independiente en cada experimento. El tipo de experimento se representa mediante el gráfico del ruido inserto en la parte superior derecha de cada panel.

Capítulo 8

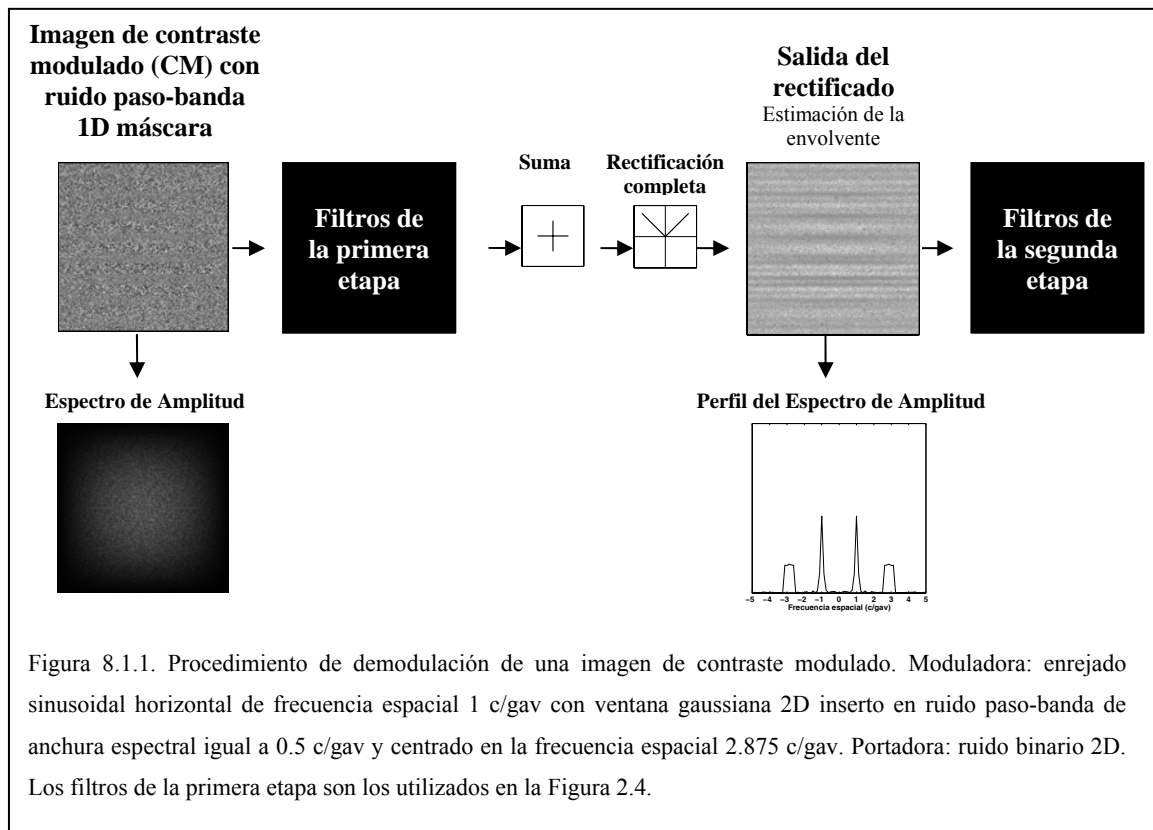
CARACTERIZACIÓN ANISOTRÓPICA DE LOS FILTROS DE LA SEGUNDA ETAPA DEL MECANISMO DE SEGUNDO ORDEN

8.1. Introducción

Como se ha repetido, para el procesamiento de los estímulos de contraste modulado (CM) se ha propuesto un esquema de segundo orden compuesto por dos etapas de filtrado consecutivas con una rectificación interpuesta (esquema FRF). Estudios previos han mostrado que las características de los filtros de la primera etapa del mecanismo de segundo orden son similares a los filtros para estímulos de luminancia (Dakin y Mareschal, 2000), por lo que en adelante utilizaremos los resultados obtenidos en el Capítulo 7 como una caracterización de los filtros de la primera etapa. El objetivo fundamental de este Capítulo es estudiar las características (forma espectral y anchura de banda de la FTM-1D) de los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden.

Para caracterizar estos filtros se ha utilizado: a) el mismo paradigma experimental de enmascaramiento bajo el modelo descrito en el Capítulo 4; b) como función portadora ruido binario 2D; c) como ruido máscara, ruido paso-banda 1D modulador; y d) como variable independiente la frecuencia central del ruido máscara modulador. En lo que sigue se justifican esas elecciones.

Con respecto al paradigma utilizado, en el Capítulo 7 se ha validado y comprobado su potencia explicativa. En la aplicación de este paradigma con estímulos de segundo orden, se supone que para demodular una imagen CM, ésta es analizada por un primer banco de filtros lineales seguidos de una suma y una rectificación completa, tras la cual, si la portadora es ruido binario 2D, la recuperación de la envolvente es prácticamente perfecta, convirtiéndose ésta en una imagen de luminancia para los filtros de la segunda etapa (véase la Figura 8.1.1), por lo que se pueden caracterizar los filtros de la segunda etapa mediante



el mismo modelo de enmascaramiento utilizado para caracterizar los filtros de primer orden (véanse los Capítulos 4 y 7). Esta es la razón por la que se ha utilizado ruido binario.

En los experimentos de enmascaramiento con estímulos de segundo orden se ha utilizado como señal una modulación sinusoidal del contraste, y como ruido máscara una modulación del contraste en forma de ruido blanco 1D filtrado paso-banda. Se eligió el ruido paso-banda, y no otro, porque permite conseguir niveles muy altos de energía, ya que concentra toda la energía del ruido en muy pocas frecuencias espaciales y de este modo facilita el enmascaramiento de la señal. En efecto, en experimentos pilotos previos se intentó sin éxito enmascarar la modulación sinusoidal del contraste con otros tipos de ruido máscara (ruido paso-todo, muesca espectral, paso-alto y paso-bajo), ruidos que, incluso con la máxima energía posible, no produjeron prácticamente ninguna elevación del umbral por encima del de detección de la señal.

En los experimentos se fijó la frecuencia de modulación de la señal y se varió la frecuencia central de modulación del ruido paso-banda máscara, procedimiento similar al utilizado en audición por Ewert y Dau (2000) para obtener la forma de los filtros auditivos

que procesan la envolvente de la señal acústica. Lógicamente, con el procedimiento seguido en esta Tesis se obtiene la forma de los filtros visuales que procesan la envolvente del estímulo visual. Un procedimiento alternativo en el que se fijaba el ruido paso-banda modulador y se variaba la frecuencia de modulación de la señal fue utilizado por Houtgast (1988) en experimentos auditivos; pero, a diferencia del utilizado aquí, con ese procedimiento se obtiene el patrón de excitación de los filtros de segundo orden para la forma de modulación, más que la forma de los filtros (Moore y Glasberg, 1983; Ewert y Dau, 2000).

8.2. Experimentación

8.2.1. Detección de una señal moduladora inserta en ruido paso-banda 1D modulador

En este experimento se estudió el efecto enmascarador del ruido paso-banda 1D ideal modulador situado en diferentes lugares del espectro (es decir, con diferentes frecuencias centrales) sobre el umbral de profundidad de modulación para la detección de una señal moduladora. En particular, se han realizado dos experimentos de enmascaramiento con ruido paso-banda, en uno se utilizó como señal moduladora un enrejado sinusoidal horizontal de frecuencia espacial igual a 1 c/gav y en otro la misma señal pero de frecuencia igual a 3 c/gav. Como en primer orden, se eligieron estas frecuencias espaciales porque están separadas más allá de una octava y además se encuentran dentro del rango donde el SVH tiene máxima sensibilidad. Aparte de poder comparar los resultados con los obtenidos en primer orden en esta Tesis y estudiar cómo varía la anchura de banda de los canales con la frecuencia de pico.

Método

Los sujetos, el equipo, la calibración del monitor, la presentación de los estímulos, la tarea, las características de los ensayos, el curso temporal de los ensayos y el procedimiento experimental para obtener los umbrales sensoriales, han sido descritos en los apartados 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Estímulos

Se han realizado dos experimentos de enmascaramiento diferentes. En cada uno de ellos se utilizó como señal una imagen de contraste modulado ($CM_{señal}$), cuya expresión general es

$$CM_{señal}(x, y) = L_0 \left[1 + k(1 + m_f f(x, y)) p(x, y) \right],$$

donde L_0 es la luminancia media, en cd/m^2 , ($L_0 = 15 \text{ cd/m}^2$); m_f es la profundidad de modulación de la señal o contraste de la función moduladora f ; y k es el contraste de la función portadora p (en todos los casos $k = 0.35$).

En particular, la imagen utilizada como señal fue ruido binario 2D cuyo contraste es modulado por un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D (véanse el Apéndice A.5.1 y la Figura A.5.1 C). La función portadora, p , es ruido binario 2D (véanse los Apéndices A.3.2 y la Figura A.5.1 B). La función moduladora del contraste, f , es una señal sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D (véase la Figura A.5.1 A)

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \cos(2\pi v_0 y + \theta),$$

donde Sx y Sy son las anchuras de la ventana gaussiana en la dirección horizontal y vertical respectivamente, en gav , ($Sx = Sy = 2.5 \text{ gav}$); v_0 es la frecuencia espacial de modulación, en c/gav ; y θ es la fase, en radianes, ($\theta = 0$). En un experimento, la frecuencia espacial de modulación fue de 1 c/gav y en el otro de 3 c/gav .

En cada experimento se utilizó como ruido máscara también una imagen de contraste modulado (CM_{ruido}), cuya expresión general es

$$CM_{ruido}(x, y) = L_0 \left[1 + k(1 + m_r r_{PBanda}(x, y)) p(x, y) \right],$$

donde L_0 es la luminancia media, en cd/m^2 , ($L_0 = 15 \text{ cd/m}^2$); m_r corresponde a la profundidad de modulación del ruido o contraste de la función moduladora r_{PBanda} ; y k es el contraste de la función portadora p ($k = 0.35$).

En particular, la imagen utilizada como ruido máscara fue ruido binario 2D cuyo contraste es modulado por ruido paso-banda (véase la Figura A.5.4 CM_{ruido}). Como en el caso anterior, la función portadora p es ruido binario 2D. La función moduladora del

contraste r_{PBanda} (ruido máscara) es ruido blanco 1D con orientación horizontal filtrado paso-banda (véase el Apéndice A.3.1.5). El ruido máscara modulador tiene una anchura de banda $Bv = 0.5$ c/gav y está centrado en una determinada frecuencia espacial (v_C). El espectro de potencia del ruido paso-banda 1D es uniforme dentro del rango de frecuencias $\left[v_C - \frac{Bv}{2} \right]$ y $\left[v_C + \frac{Bv}{2} \right]$ c/gav. La densidad espectral de potencia del ruido paso-banda $r_{PBanda}(x, y)$ fue siempre la misma $N_0 = 16 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$. Como se puede ver, esta densidad espectral de potencia es muy superior a la utilizada con estímulos de primer orden ya que para enmascarar estímulos de segundo orden se requiere una mayor energía del ruido máscara. En este caso, como en primer orden, cada ruido modulador máscara necesita un contraste particular para generar una densidad espectral de potencia determinada (véase el Apéndice A.3.1 para su cálculo).

En cada ensayo la función portadora fue diferente en cada una de las dos presentaciones. El ruido máscara modulador fue diferente en cada una de las dos presentaciones. Ahora bien, en la presentación en la que la señal moduladora está inserta en el ruido máscara modulador, la función portadora fue idéntica para ambas moduladoras. El procedimiento particular para enmascarar la señal moduladora con el ruido modulador puede verse en los Apéndices A.5.3 y A.5.4.

Procedimiento

Los dos experimentos son similares a los realizados con estímulos de primer orden (véase el apartado 7.4). La diferencia fundamental es que, en este caso, la señal y el ruido máscara son funciones moduladoras del contraste de una misma función portadora. En el primer experimento se obtuvieron los umbrales de profundidad de modulación para la detección de una señal moduladora de frecuencia espacial $v_0 = 1$ c/gav inserta en ruido paso-banda 1D modulador con diez frecuencias centrales que van desde $v_C = 0.25$ c/gav hasta $v_C = 5.656$ c/gav en pasos de media octava. En el segundo experimento, la frecuencia espacial de modulación fue $v_0 = 3$ c/gav y se usaron nueve frecuencias centrales del ruido que van desde $v_C = 0.75$ c/gav hasta $v_C = 8.48$ c/gav en pasos de media octava. En ambos

experimentos, estos pasos son aproximados ya que el valor de la frecuencia central no se puede conseguir exactamente en algunos casos debido a la frecuencia de muestreo de la imagen en el dominio de Fourier. En el segundo experimento se obtuvo a la vez el umbral para la detección de la señal de frecuencia espacial de modulación $\nu_0 = 3$ c/gav en ausencia de ruido máscara externo. El umbral de detección para la frecuencia espacial de modulación $\nu_0 = 1$ c/gav en ausencia de ruido máscara externo se obtuvo del experimento de linealidad (véase el apartado 6.3).

Cuando se utiliza la técnica de entrelazado directamente con las imágenes $CM_{señal}$ y CM_{ruido} para conseguir enmascarar la señal moduladora con el ruido modulador, no es posible controlar de modo independiente el contraste de la señal moduladora y el contraste del ruido máscara modulador (véanse las razones en el Apéndice A.5.3). En el Apéndice A.5.4 se presenta la solución a ese problema metodológico y el procedimiento completo para poder controlar de modo independiente ambos contrastes.

En cada experimento, cada umbral es el resultado de la media de tres estimaciones utilizando la tarea de elección forzada de dos alternativas con presentación temporal. En cada ensayo se presentaban dos tipos diferentes de ruido máscara donde sólo en uno de ellos se encontraba inserta la señal. Durante todo el experimento, en cada presentación dentro de cada ensayo no se repitió ninguna muestra de ruido máscara ni tampoco la función portadora (ruido binario 2D). Se utilizó un procedimiento bayesiano de determinación de los umbrales sensoriales.

Cada sesión experimental en ambos experimentos consistió en la obtención de cinco umbrales, uno por frecuencia central del ruido paso-banda. También se incluyó la estimación del umbral para la señal 3 c/gav en ausencia del ruido. La estimación de un umbral duró aproximadamente cinco minutos por lo que aproximadamente cada sesión duró veinticinco minutos. En total, cada sujeto realizó doce sesiones experimentales en diferentes días.

Resultados y discusión

En las Figuras 8.2.1 y 8.2.2 se presentan los resultados pertenecientes a los sujetos IS y GB. En la Figura 8.2.1 están representados los resultados del experimento donde se utilizó

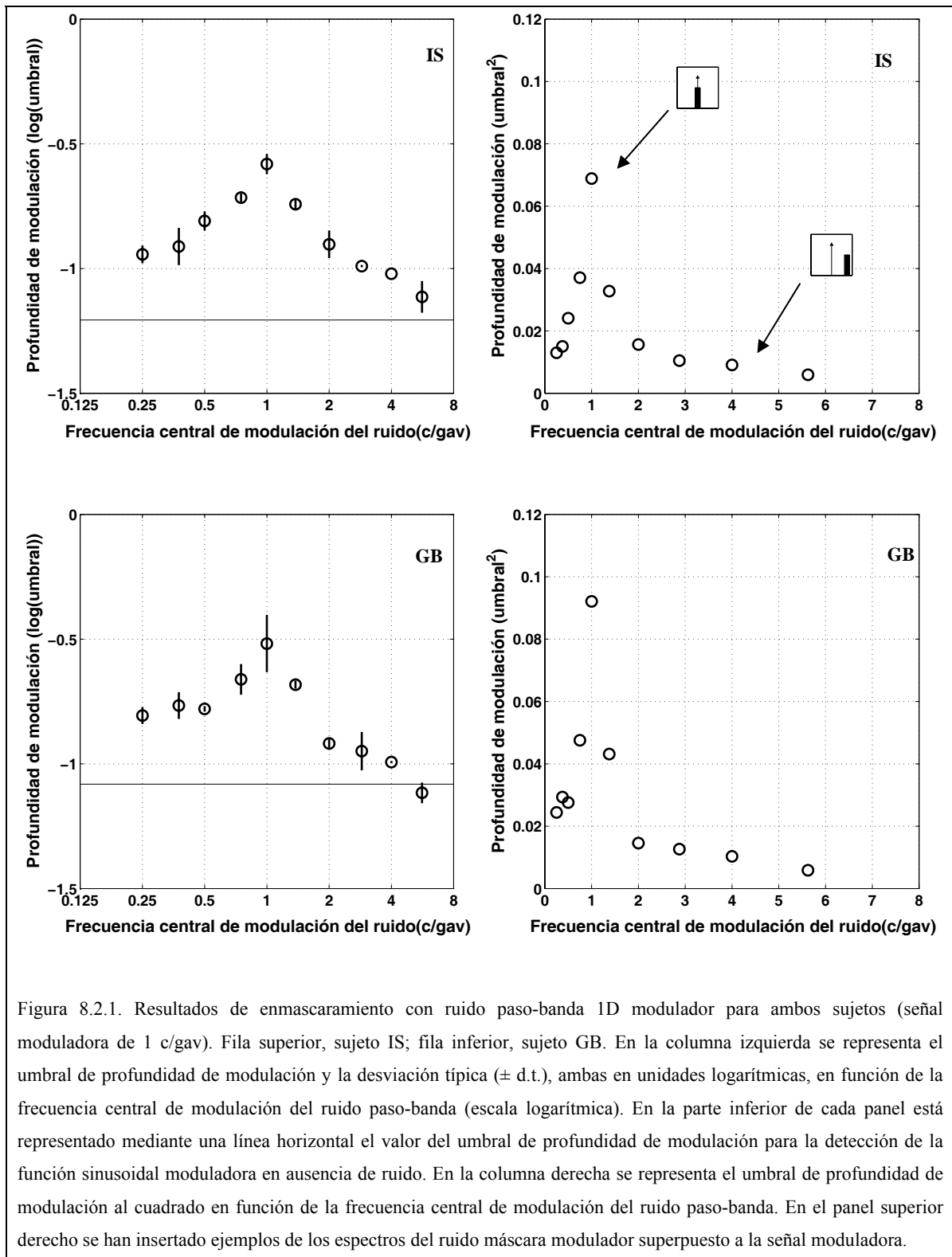


Figura 8.2.1. Resultados de enmascaramiento con ruido paso-banda 1D modulador para ambos sujetos (señal moduladora de 1 c/gav). Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa el umbral de profundidad de modulación y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, en función de la frecuencia central de modulación del ruido paso-banda (escala logarítmica). En la parte inferior de cada panel está representado mediante una línea horizontal el valor del umbral de profundidad de modulación para la detección de la función sinusoidal moduladora en ausencia de ruido. En la columna derecha se representa el umbral de profundidad de modulación al cuadrado en función de la frecuencia central de modulación del ruido paso-banda. En el panel superior derecho se han insertado ejemplos de los espectros del ruido máscara modulador superpuesto a la señal moduladora.

como señal una función sinusoidal moduladora de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav; en la Figura 8.2.2 están representados los resultados para la señal moduladora de frecuencia espacial $\nu_0 = 3$ c/gav. En los paneles de la columna izquierda de ambas figuras están representados los umbrales de profundidad de modulación o umbrales de contraste de la función moduladora (unidades logarítmicas) y las desviaciones típicas para la detección de la señal inserta en ruido paso-banda 1D horizontal modulador en función de las frecuencias centrales de modulación del ruido máscara. En la parte inferior de los dos paneles (columna izquierda) se ha representado mediante una línea horizontal el valor del umbral de profundidad de modulación para detectar la misma señal pero en ausencia de ruido máscara modulador. En los paneles de la columna derecha de ambas figuras están representados los mismos umbrales pero en unidades de contraste al cuadrado.

Como se observa en ambas Figuras, el umbral de profundidad de modulación para la detección de la señal crece con la proximidad de la frecuencia central de modulación del ruido paso-banda a la frecuencia espacial de modulación de la señal. Ahora bien, como en los resultados obtenidos en primer orden (véase el apartado 7.2.4), aparece una cierta asimetría (en escala logarítmica y en escala lineal) en el enmascaramiento, un poco más pronunciada para la señal de frecuencia de modulación $\nu_0 = 1$ c/gav. Un resultado análogo a éste, pero con estímulos de segundo orden que son modulaciones de frecuencia de la textura y utilizando el paradigma experimental de enmascaramiento oblicuo fue obtenido por Arsenault et al. (1999; fig. 4).

Si se supone que un único filtro de la segunda etapa detecta la señal y además está centrado en la frecuencia espacial de ésta, los datos de enmascaramiento obtenidos con ruido paso-banda de banda estrecha mostrarían aproximadamente la forma de la FTM-1D del filtro implicado en la detección. Además, al comparar los datos de enmascaramiento para los dos tipos de señal (1 y 3 c/gav), se observa que la anchura de banda en octavas del canal centrado en 1 c/gav es mayor que la del centrado en 3 c/gav, y por lo tanto, la anchura de banda en octavas del canal decrecería con el aumento de la frecuencia de modulación espacial central de éste. Sin embargo, al igual que sucede en primer orden, al utilizar ruido máscara paso-banda también puede darse el efecto de off-frequency looking

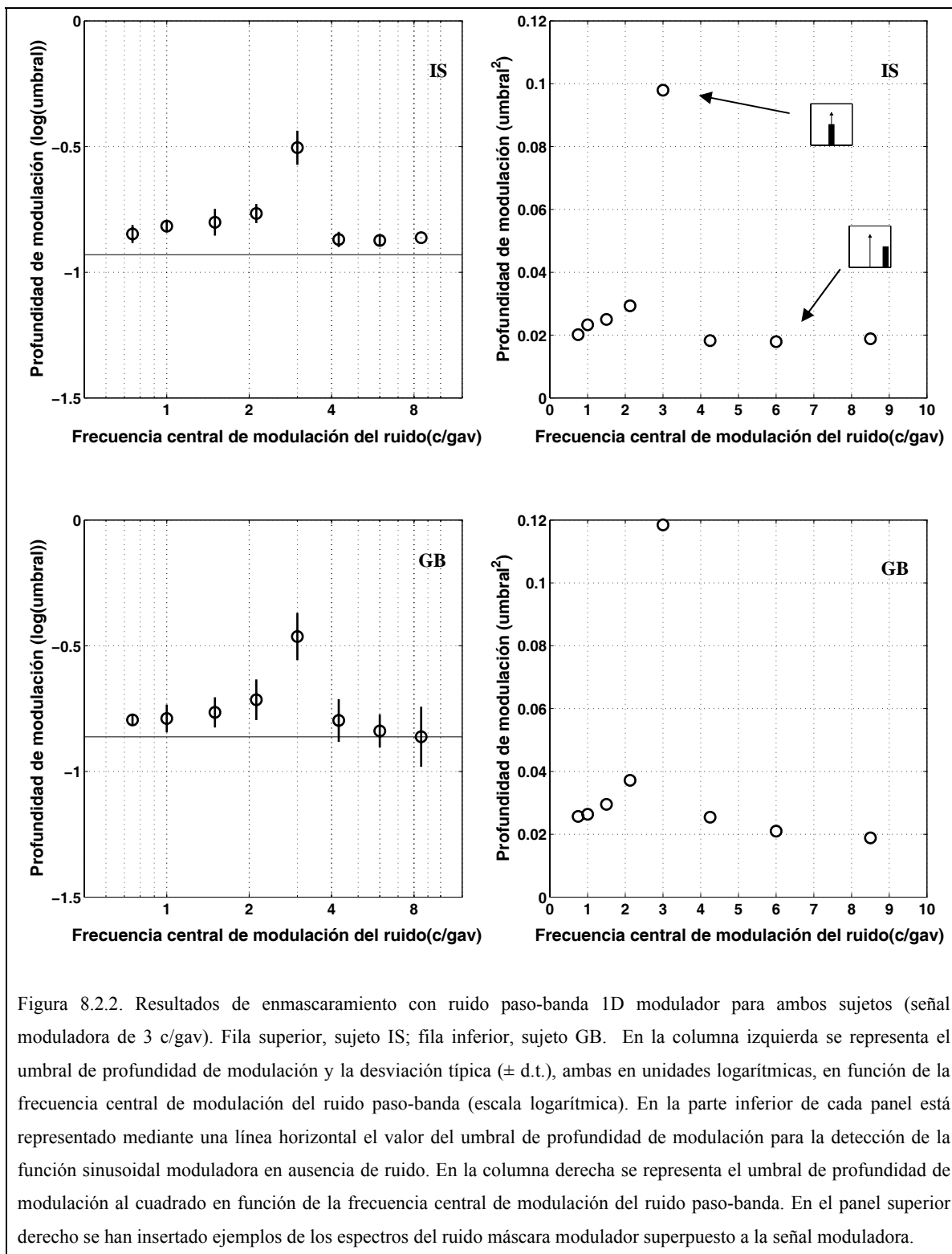


Figura 8.2.2. Resultados de enmascaramiento con ruido paso-banda 1D modulador para ambos sujetos (señal moduladora de 3 c/gav). Fila superior, sujeto IS; fila inferior, sujeto GB. En la columna izquierda se representa el umbral de profundidad de modulación y la desviación típica (\pm d.t.), ambas en unidades logarítmicas, en función de la frecuencia central de modulación del ruido paso-banda (escala logarítmica). En la parte inferior de cada panel está representado mediante una línea horizontal el valor del umbral de profundidad de modulación para la detección de la función sinusoidal moduladora en ausencia de ruido. En la columna derecha se representa el umbral de profundidad de modulación al cuadrado en función de la frecuencia central de modulación del ruido paso-banda. En el panel superior derecho se han insertado ejemplos de los espectros del ruido máscara modulador superpuesto a la señal moduladora.

con los filtros que detectan la modulación del contraste y entonces estos resultados no mostrarían directamente ni la forma ni la anchura de banda de la FTM-1D de ningún canal.

8.3. Ajuste del modelo de enmascaramiento y estimación de sus parámetros

Según el esquema FRF propuesto, si la función moduladora está compuesta por una señal inserta en ruido y la función portadora es ruido binario 2D, entonces para caracterizar los filtros de la segunda etapa del mecanismo FRF se puede aplicar directamente el modelo de enmascaramiento ya utilizado.

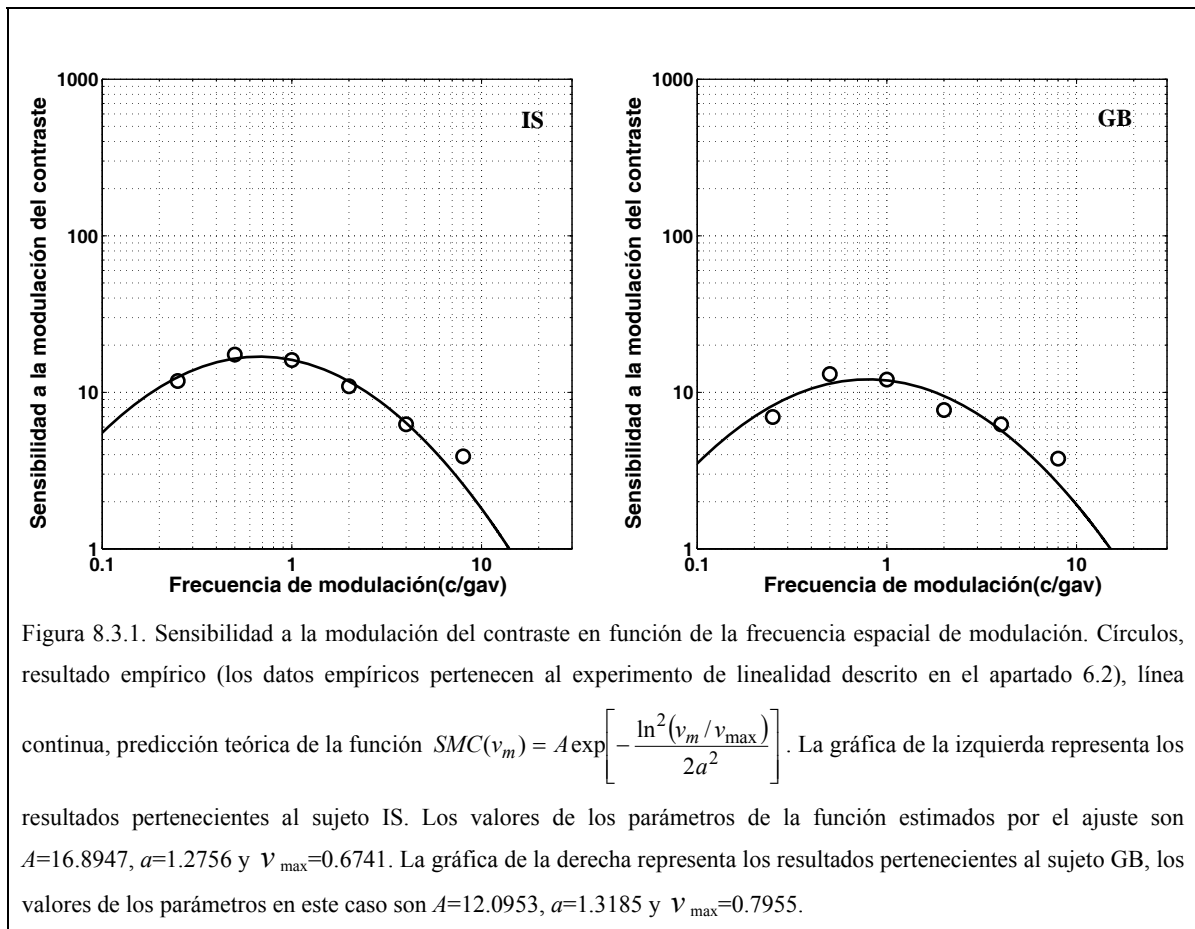
8.3.1 Objetivo

Suponiendo el mismo modelo de enmascaramiento aplicado a los estímulos de primer orden, se ha procedido a ajustar las predicciones del modelo a los umbrales de enmascaramiento con estímulos de segundo orden. El objetivo fundamental del ajuste es caracterizar los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden, es decir: a) decidir qué forma espectral (asimétrica o simétrica, véase el apartado 4.3 (B)) tienen las FTM-1D de los canales psicofísicos de la segunda etapa; b) determinar las anchuras de banda de estas FTM-1D y la relación con su frecuencia de pico (véase el apartado 4.3 (C)); y c) decidir qué modelo de detección (con canal fijo o con canal variable, (véase el apartado 4.4) explica mejor los resultados de los experimentos de enmascaramiento.

8.3.2. Predicciones del modelo de enmascaramiento

Como se ha visto en el Capítulo 4 y en el apartado 7.3.2, para poder ajustar las predicciones del modelo de enmascaramiento a los datos empíricos de segundo orden, también es necesario conocer: a) la forma funcional para las FTM-1D de los canales psicofísicos de la segunda etapa; b) un modelo de detección; c) la anchura de banda de las FTM-1D en función de su frecuencia de pico; d) el espectro de potencia del ruido máscara externo; e) la sensibilidad del sujeto; y f) el valor del ruido interno de cualquier canal. Pues bien:

- a) Para la forma de la FTM-1D de los canales psicofísicos de la segunda etapa se han supuesto la forma *asimétrica* (función lognormal, véase la ecuación (4.17)) o *simétrica* (módulo de la transformada de Fourier de una función de Gabor, véase la ecuación (4.19)).
- b) Se han supuesto dos modelos de detección, *modelo de detección de canal fijo* (apartado 4.4, A; véase también ecuación (4.24)), y *modelo de detección de canal variable* (véase el apartado 4.4, B; véase también la ecuación (4.1)).
- c) La relación entre la anchura de banda a la mitad de la FTM-1D y su frecuencia de pico que vendrá determinada por la ecuación (4.21). Por lo tanto, para conocer la relación es necesario estimar los valores de los parámetros B y b de esta ecuación.
- d) El tipo de ruido máscara externo (ruido paso-banda) utilizado como modulador tiene un espectro de potencia uniforme dentro de una banda de frecuencias espaciales (véase el Apéndice 3) y la predicción del modelo dependerá de éste (véase el apartado 4.6 y Apéndice 7).
- e) La sensibilidad del sujeto en los experimentos de enmascaramiento viene determinada por el valor del parámetro s del modelo de enmascaramiento (véase la ecuación (4.1)), por lo tanto es necesario estimar este parámetro.
- f) Con respecto al valor del ruido interno de un canal k de la segunda etapa del modelo FRF, es necesario conocer el valor de $m_0^2(v_k)$ (véase la ecuación (4.13), véase también el apartado 4.3, A-2), que es el umbral de profundidad de modulación al cuadrado para la detección de un enrejado sinusoidal horizontal modulador de frecuencia espacial v_k en ausencia de ruido máscara modulador. Por lo tanto, si se desea conocer el ruido interno un canal, es necesario estimar el umbral de contraste para un enrejado modulador de frecuencia espacial de modulación igual a la frecuencia de pico de ese canal. Esta estimación se ha realizado ajustando la función de sensibilidad a la modulación del contraste (*FSMC-1D* con parámetros A , a , y v_{\max} véase la ecuación (4.16)) a la inversa de los umbrales de profundidad de modulación ($1/m_0(v_m)$) mediante el procedimiento de mínimos cuadrados (véase el Apéndice 9). Los umbrales ($m_0(v_m)$) utilizados son los encontrados en el experimento de linealidad con estímulos de segundo orden (imágenes de



contraste modulado por enrejados sinusoidales horizontales con ventana gaussiana en ausencia de ruido máscara externo) (véase el apartado 6.3). En la Tabla 8.1 aparecen los valores de los parámetros estimados A , a , y v_{\max} de la *FSMC-ID* para cada sujeto. [Nótese que v_{\max} es la frecuencia donde la *FSMC-ID* tiene el máximo].

Tabla 8.1

Parámetros de la <i>FSMC-ID</i>			
Sujeto	A	a	v_{\max} (c/gav)
IS	16.8947	1.2756	0.6741
GB	12.0953	1.3185	0.7955

El ajuste de la *FSMC-ID* para cada sujeto puede verse en la Figura 8.3.1. Se observa que la función ajustada predice con cierta precisión la relación entre la sensibilidad a la

modulación del contraste y la frecuencia espacial de la modulación. La agudeza visual (A.V.) teórica para modulaciones sinusoidales del contraste para el sujeto IS es aproximadamente $A.V.=14$ c/gav y para el sujeto GB, $A.V.=15$ c/gav. Una vez estimados los parámetros de la función *FSMC-ID* para cada sujeto, se pueden obtener los umbrales de profundidad de modulación al cuadrado ($m_0^2(v)$) para cualquier frecuencia espacial moduladora mediante la ecuación (4.14).

8.3.3. Método

Se han ajustado las predicciones del modelo de enmascaramiento a los umbrales empíricos de profundidad de modulación al cuadrado obtenidos mediante el paradigma de enmascaramiento. Las variables independientes y los parámetros relevantes de la señal y del ruido, utilizados tanto en los experimentos como en los ajustes del modelo pueden verse en la tabla 8.2.

Como se ha visto en apartado 8.3.2, supuesta una forma para la FTM-1D de los canales de la segunda etapa del mecanismo FRF, un modelo de detección, una forma funcional que relaciona la anchura de banda de la FTM-1D con su frecuencia de pico, conocido el espectro de potencia del ruido máscara con sus parámetros relevantes, y conocido el valor de m_0^2 para cualquier frecuencia espacial de modulación, basta estimar el valor de los tres parámetros: B , b y s para predecir los umbrales de la modulación del contraste al cuadrado.

En total para cada sujeto se realizaron ajustes para cuatro condiciones diferentes, resultado factorial de combinar 2 formas del canal (asimétrica o simétrica) \times 2 tipos de detección (canal fijo o canal variable).

El procedimiento algorítmico de ajuste para estimar los valores B , b y s , es idéntico al utilizado en la caracterización de los canales de primer orden (véase el apartado 7.3.3).

Tabla 8.2. Tipos de ruido, variables independientes y parámetros relevantes.		
Tipo de ruido	Variable independiente ^a	Parámetros ^b
Paso-banda	ν_C , desde 0.25 c/gav hasta 5.65 c/gav para $\nu_0=1$ c/gav y desde 0.75 c/gav hasta 12 c/gav para $\nu_0=3$ c/gav en pasos de media octava.	$\nu_0 = 1\text{c/gav}$ (Experimento 1) $\nu_0 = 3\text{c/gav}$ (Experimento 2) $N_0=16 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$ $B\nu = 0.5 \text{c/gav}$

a. ν_C , frecuencia central de modulación del ruido. b. $B\nu$, anchura espectral del ruido.

8.3.4. Resultados

En la Tabla 8.2 se presentan los resultados de los ajustes del modelo de enmascaramiento para las cuatro condiciones mencionadas. De izquierda a derecha, cada columna representa el sujeto (IS o GB), el tipo de ajuste (paso-banda 1 y 3 c/gav), la forma del canal (asimétrica o simétrica), el modelo de detección (canal fijo o canal variable), los valores estimados de los parámetros relativos a la sensibilidad del sistema (s) y a la anchura de las FTM-1D (B y b), las anchuras de banda en octavas de las FTM-1D centradas en 1 y 3 c/gav, y la última columna corresponde a la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado (Root Mean Square Error) en unidades logarítmicas ($\log_{10}(\text{RMSE})$, véase el Apéndice 9). La Figura 8.3.2 sintetiza gráficamente los resultados de la Tabla 8.3. En la Figura 8.3.3 se representa la anchura de banda total en octavas a la mitad de la FTM del canal en función de su frecuencia de pico. En las Figuras desde la 8.3.4 hasta la 8.3.7 (final del Capítulo) se representan gráficamente los cuatro ajustes del modelo de enmascaramiento para cada sujeto.

En la Figura 8.3.2 se observa que los ajustes del modelo de enmascaramiento son similares con independencia de la forma de la FTM del canal supuesta (asimétrica o simétrica) y del modelo de detección (canal fijo o variable) supuesto. Como en los experimentos de primer orden, las anchuras de banda de las FTM-1D estimadas a partir del ajuste del modelo de enmascaramiento con canal fijo son en general menores que las anchuras de banda estimadas a partir del ajuste del modelo con canal variable (véase la

Tabla 8.3). Sin embargo, si comparamos las anchuras de banda con las obtenidas con los filtros de primer orden (cuando se supone el mismo modelo de detección), éstas son similares. Por ejemplo, en la Figura 8.3.3 se han representado (con línea continua) las anchuras de banda en octavas de las FTM-1D de los filtros de la segunda etapa en función de su frecuencia de pico suponiendo el modelo de canal variable (sujeto IS) o el modelo de canal fijo (sujeto GB), según la ecuación (4.21) con los parámetros estimados (B y b). También, (con línea discontinua) se han representado las anchuras de banda en octavas de las FTM-1D de los filtros de primer orden (o filtros de la primera etapa) en función de su frecuencia de pico suponiendo el mismo modelo de detección para cada sujeto. Como se aprecia, las anchuras de banda de ambos tipos de filtros son similares. Otro resultado fundamental es que la anchura de banda en octavas de los filtros de la segunda etapa también decrece con el aumento de su frecuencia de pico. Aunque como se ha dicho anteriormente, a partir de los resultados aquí obtenidos no se puede decidir por una u otra forma para la FTM-1D de los filtros de la segunda etapa, en adelante, para la caracterización del mecanismo de segundo orden (véase Capítulo 9) se adoptará la forma simétrica (gaussiana) ya que ésta es la más adoptada en los modelos teóricos de segundo orden.

Tabla 8.3. Resultados de los ajustes del modelo de enmascaramiento									
Suj.	Tipo de ajuste	Forma del canal	Modelo de detección	s	B	b	Boct 1 c/gav	Boct 3 c/gav	$\log_{10}(\text{RMSE})$ del ajuste
IS	Paso-banda 1 y 3 c/gav	Asimétrica	Fijo	0.3865	0.8098	0.7500	1.04	0.79	-2.127
			Variable	0.4098	2.3598	1.0013	1.86	1.11	-2.163
		Simétrica	Fijo	0.4009	1.1844	0.7612	1.19	0.82	-2.164
			Variable	0.4079	3.0529	0.7677	1.89	0.91	-2.135
GB	Paso-banda 1 y 3 c/gav	Asimétrica	Fijo	0.3161	0.8853	0.7451	1.07	0.78	-2.062
			Variable	0.3289	1.9897	0.9785	1.71	1.07	-2.112
		Simétrica	Fijo	0.3336	1.5261	0.7374	1.29	0.81	-2.111
			Variable	0.3356	3.6028	0.7142	2.03	0.89	-2.147

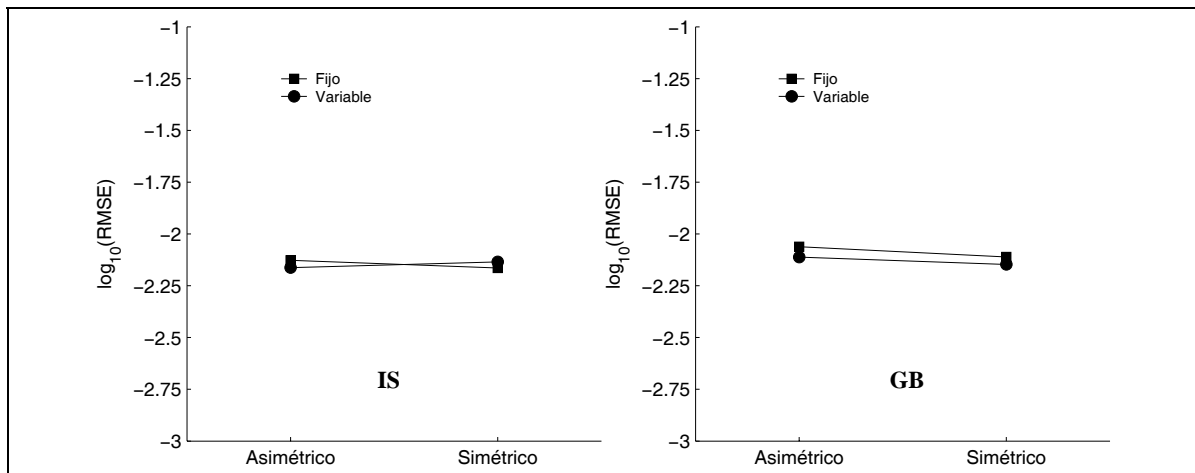


Figura 8.3.2. Resultados del ajuste del modelo de enmascaramiento a los experimentos con ruido paso-banda 1 y 3 c/gav (véase la Tabla 8.1) para las dos formas de las FTM-1D de los canales (asimétrico y simétrico), y para los dos procedimientos de detección (canal fijo y canal variable). Panel de la izquierda, sujeto IS; panel derecho, sujeto GB. Nótese que cuanto menor es el valor de $\log_{10}(\text{RMSE})$ mejor es el ajuste del modelo a los datos.

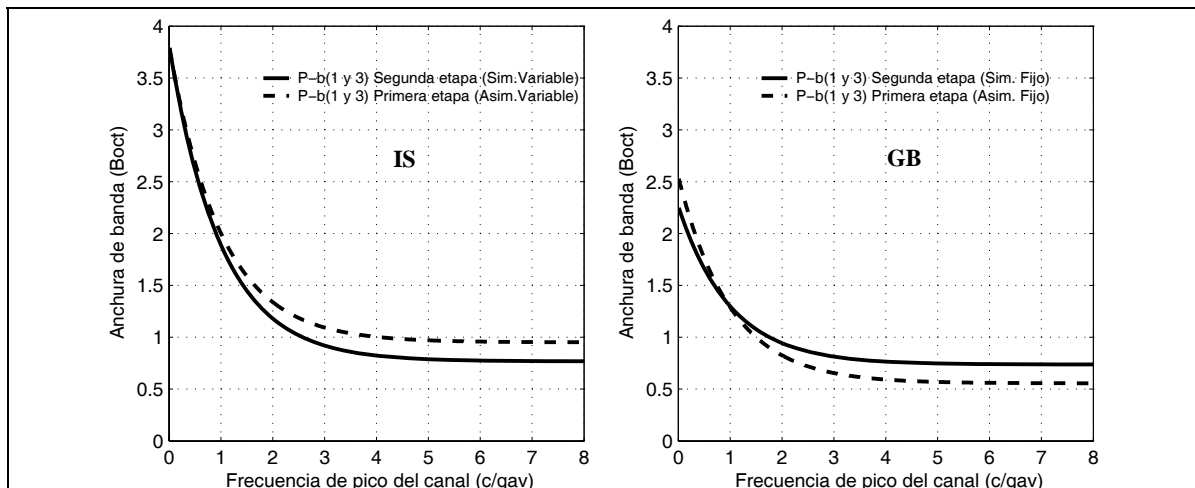


Figura 8.3.3. Anchura de banda total (en octavas) a la mitad de la FTM-1D de los canales de primer orden y de los canales de la segunda etapa (segundo orden) en función de la frecuencia de pico del canal. En ambos paneles las anchuras de banda han sido estimadas a partir de los umbrales obtenidos en los experimentos con ruido paso-banda y señal con frecuencia espacial de 1 y 3 c/gav. Panel izquierdo: Sujeto IS. La línea continua representa los resultados para los canales de la segunda etapa, suponiendo la forma del canal simétrica y modelo de detección de canal variable; línea discontinua, resultados para los canales de la primera etapa, suponiendo la forma del canal asimétrica y el mismo modelo de detección. Panel derecho: Sujeto GB. La línea continua representa los resultados para los canales de la segunda etapa, suponiendo la forma del canal simétrica y modelo de detección de canal fijo; línea discontinua, resultados para primer orden, suponiendo forma del canal asimétrica y el mismo modelo de detección.

8.4. Discusión general

Hasta donde llega mi conocimiento, ésta es la primera vez que se caracteriza psicofísicamente la forma de la FTM-1D de los filtros de la segunda etapa del mecanismo espacial de segundo orden y se determina la relación entre su anchura de banda y la frecuencia de pico, utilizando estímulos CM estáticos, el modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas y ruido máscara modulador. Por esta razón, como no existen datos previos similares, en esta discusión, junto con el análisis de los resultados propios, éstos se comparan con los obtenidos en experimentos con otros paradigmas experimentales o con el paradigma de enmascaramiento con otros tipos de máscara moduladora.

De los resultados obtenidos en los ajustes se concluye que las dos formas probadas para la FTM-1D de los canales de la segunda etapa del esquema FRF predicen por igual los umbrales de modulación de contraste en los experimentos de enmascaramiento. Landy y Oruc (2002; fig. 7 C, suj. ELA) con el paradigma de suma subumbral y estímulos con orientación modulada y Arsenault et al. (1999; fig. 4) con el paradigma experimental de enmascaramiento oblicuo con estímulos de frecuencia modulada, estiman directamente a partir de los umbrales que la forma de los filtros de segundo orden es simétrica (aunque no especifican que sean los filtros de la segunda etapa). Desde un punto de vista teórico, la mayor parte de los modelos basados en el esquema FRF suponen también una forma simétrica para la FTM de los canales de la segunda etapa y, en particular, funciones de Gabor para sus sensores componentes (Mareschal y Baker, 1998; Schofield, 2000; Mussap, 2001; Landy y Oruc, 2002; Johnston y Baker, 2004).

En esta Tesis también se ha mostrado que las anchuras de banda en octavas de los filtros de la segunda etapa decrecen cuando aumenta la frecuencia de pico de éstos (véanse la Tabla 8.3 y la Figura 8.3.3). Ni ésta relación, ni los valores concretos de las anchuras de banda son comparables con los obtenidos en experimentos realizados hasta ahora debido a la clase de estímulos de segundo orden (formalmente distintos a los nuestros) y/o los diferentes paradigmas experimentales utilizados. Un experimento cuyos datos son lejanamente comparables con los nuestros es el llevado a cabo por Hutchinson y Ledgeway (2004), que utilizan el paradigma de enmascaramiento con estímulo máscara que son dos sinusoides situados a los lados de la señal y donde los estímulos de segundo orden son de

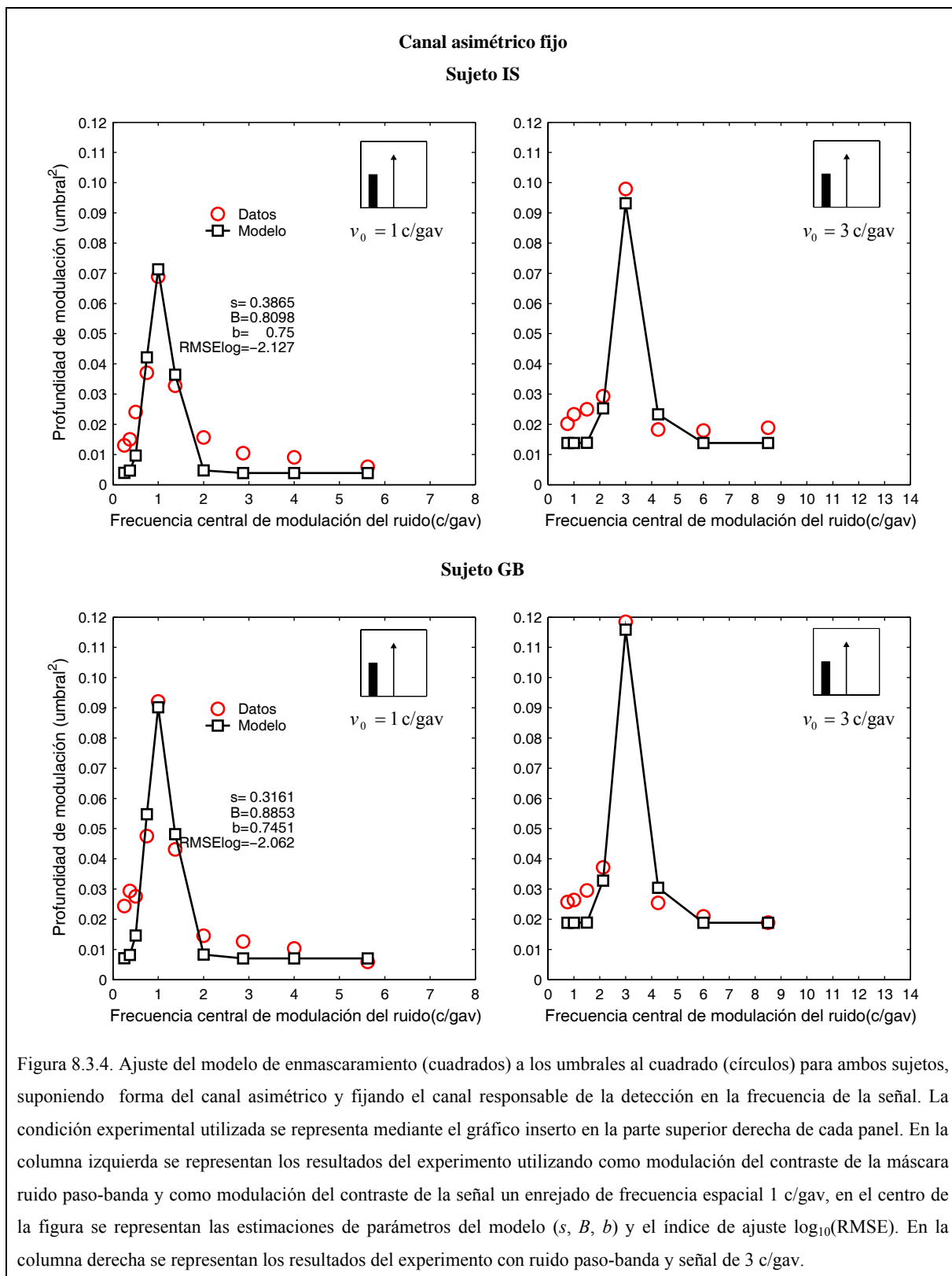
contraste modulado con movimiento. Suponen que los canales de segundo orden tienen una forma paso-banda y que su forma es simétrica en escala logarítmica. A partir de este supuesto encuentran (siempre con estímulos CM en movimiento) que la anchura de banda total a la mitad de la función era de 1.48 octavas con independencia de la frecuencia de pico de los canales, resultado contradictorio con el obtenido por nosotros. Otros experimentos cuyos datos no son comparables por las razones citadas anteriormente se describen aquí porque han sido ampliamente citados en el contexto de la visión espacial de segundo orden. Landy y Oruc (2002), encuentran que la anchura de banda de los canales de segundo orden que procesan orientación modulada fue aproximadamente de 1 octava (aunque solo miden la anchura de un teórico canal). Arsenault et al. (1999) encuentran que la anchura de banda del canal de segundo orden que procesa la información de frecuencia modulada (para frecuencia de modulación de la señal de 0.2 c/gav) está entre 1.43 y 1.74 octavas.

También estudios fisiológicos arrojan resultados similares. Mareschal y Baker (1999), estimaron las anchuras de banda de neuronas no lineales del área 18 del gato. Utilizando estímulos de segundo orden de amplitud modulada o contraste modulado, donde la envolvente (con movimiento) y portadora (estática) eran enrejados sinusoidales, la media de las anchuras de banda fue 1.46 octavas para envolventes con frecuencia media de 0.066 c/gav y con frecuencia media de la portadora de 1.09 c/gav.

Los resultados experimentales de esta Tesis favorecen la idea de que el SVH descompone la envolvente espacial de las imágenes mediante un banco de filtros paso-banda solapados, lineales, independientes y actuando en paralelo. Esta idea está de acuerdo con los modelos actuales propuestos para el procesamiento de la envolvente auditiva (Dau 1996; Dau, Kollmeier y Kolrausch 1997a, 1997b; Ewert y Dau, 2000). De nuestros datos también se puede concluir que la forma y las anchuras de los canales de la segunda etapa son similares a los de la primera etapa aunque con un rango de frecuencias espaciales de actuación diferente. El rango de frecuencias espaciales de los canales de la primera etapa en las condiciones lumínicas de este trabajo alcanza hasta una frecuencia entre 20 c/gav y 25 c/gav. Sin embargo para los canales de la segunda etapa este rango alcanza aproximadamente hasta una frecuencia entre 14 c/gav y 15 c/gav. Por lo tanto, la

arquitectura funcional (estructura y caracterización) de los canales de la segunda etapa parece replicar la arquitectura de los canales de la primera etapa sin que haya un aspecto distintivo salvo el rango de actuación.

Por último, como se ha dicho anteriormente, de los resultados obtenidos en esta Tesis no se puede decidir cuál de las dos formas propuestas para la FTM-1D de los filtros de la segunda etapa es la que mejor predice los resultados de enmascaramiento. Futuros trabajos deberían ampliar el número de formas funcionales para la FTM de los canales y el número de frecuencias espaciales de modulación para la señal, e intentar la caracterización 2D de estos filtros.



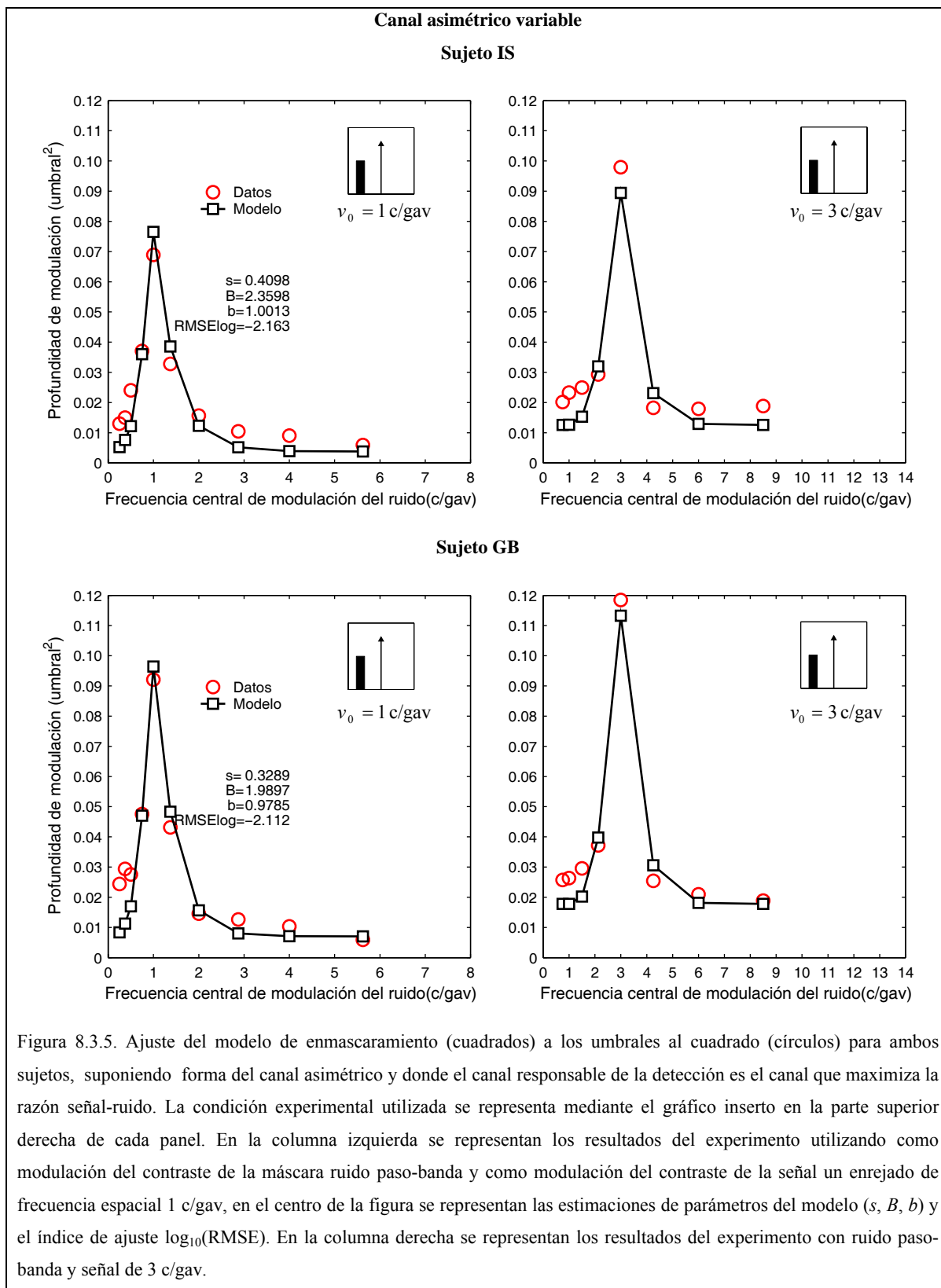


Figura 8.3.5. Ajuste del modelo de enmascaramiento (cuadrados) a los umbrales al cuadrado (círculos) para ambos sujetos, suponiendo forma del canal asimétrico y donde el canal responsable de la detección es el canal que maximiza la razón señal-ruido. La condición experimental utilizada se representa mediante el gráfico inserto en la parte superior derecha de cada panel. En la columna izquierda se representan los resultados del experimento utilizando como modulación del contraste de la máscara ruido paso-banda y como modulación del contraste de la señal un enrejado de frecuencia espacial 1 c/gav, en el centro de la figura se representan las estimaciones de parámetros del modelo (s , B , b) y el índice de ajuste $\log_{10}(\text{RMSE})$. En la columna derecha se representan los resultados del experimento con ruido paso-banda y señal de 3 c/gav.

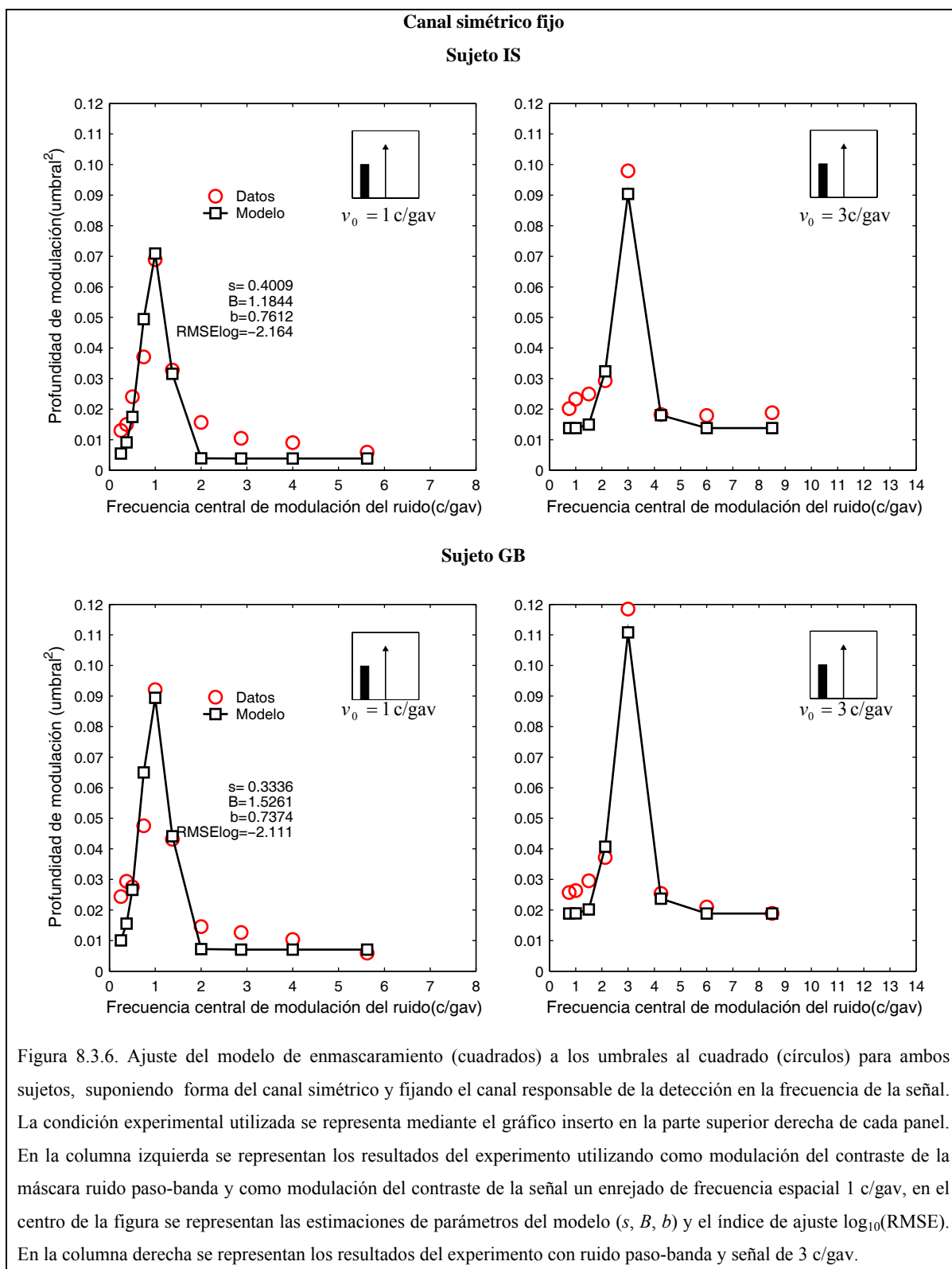


Figura 8.3.6. Ajuste del modelo de enmascaramiento (cuadrados) a los umbrales al cuadrado (círculos) para ambos sujetos, suponiendo forma del canal simétrico y fijando el canal responsable de la detección en la frecuencia de la señal. La condición experimental utilizada se representa mediante el gráfico inserto en la parte superior derecha de cada panel. En la columna izquierda se representan los resultados del experimento utilizando como modulación del contraste de la máscara ruido paso-banda y como modulación del contraste de la señal un enrejado de frecuencia espacial 1 c/gav, en el centro de la figura se representan las estimaciones de parámetros del modelo (s , B , b) y el índice de ajuste $\log_{10}(\text{RMSE})$. En la columna derecha se representan los resultados del experimento con ruido paso-banda y señal de 3 c/gav.

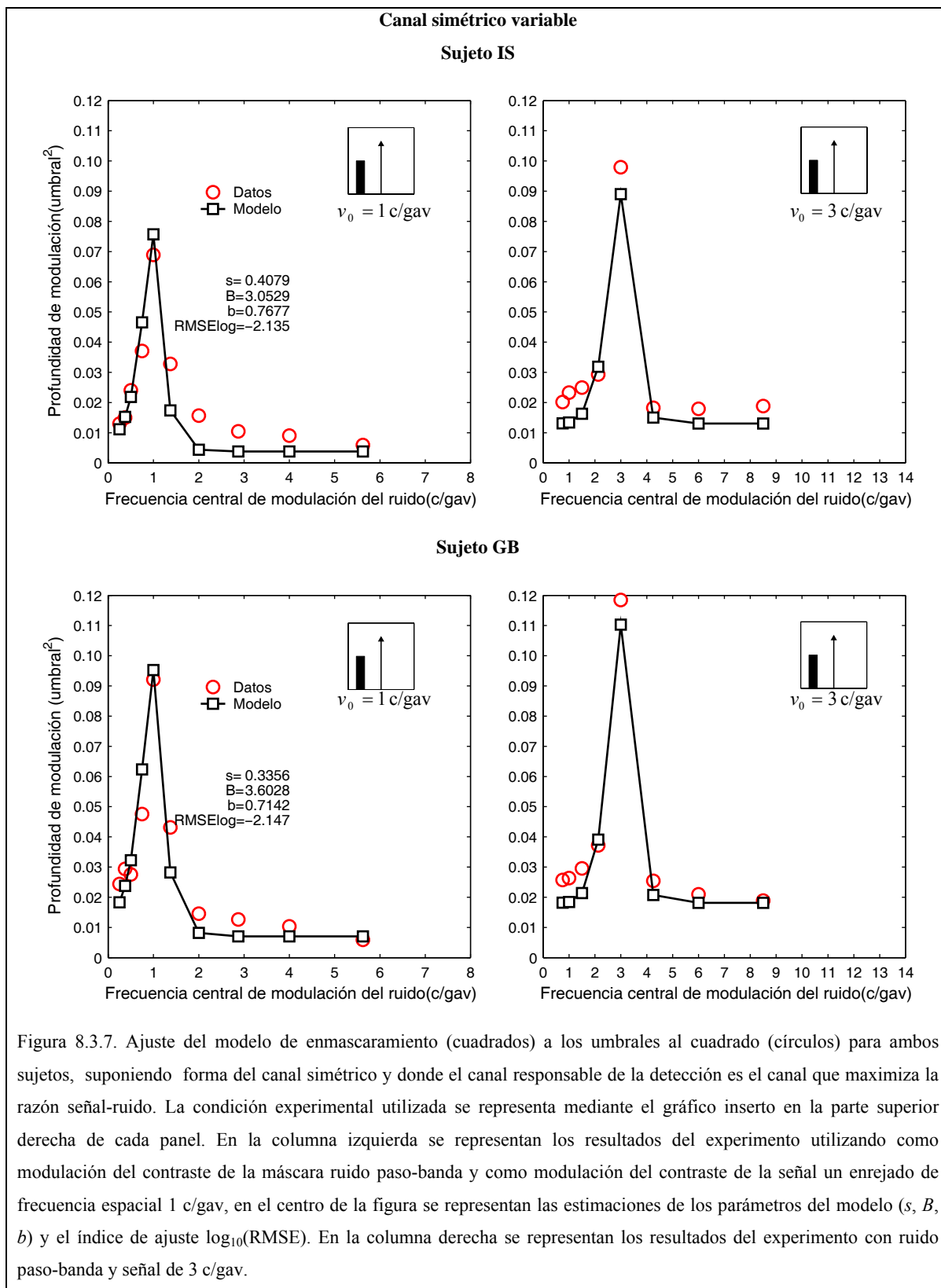


Figura 8.3.7. Ajuste del modelo de enmascaramiento (cuadrados) a los umbrales al cuadrado (círculos) para ambos sujetos, suponiendo forma del canal simétrico y donde el canal responsable de la detección es el canal que maximiza la razón señal-ruido. La condición experimental utilizada se representa mediante el gráfico inserto en la parte superior derecha de cada panel. En la columna izquierda se representan los resultados del experimento utilizando como modulación del contraste de la máscara ruido paso-banda y como modulación del contraste de la señal un enrejado de frecuencia espacial 1 c/gav, en el centro de la figura se representan las estimaciones de los parámetros del modelo (s , B , b) y el índice de ajuste $\log_{10}(RMSE)$. En la columna derecha se representan los resultados del experimento con ruido paso-banda y señal de 3 c/gav.

Capítulo 9

EXPLICACIÓN CUALITATIVA DE ALGUNOS FENÓMENOS DE LA VISIÓN ESPACIAL

9.1. Introducción

En este Capítulo, se desarrolla un modelo computacional para el mecanismo de segundo orden basado en el esquema FRF con los datos obtenidos en esta Tesis para el sujeto IS. A partir de una extensión a 2D del modelo se explicarán cualitativamente algunos resultados experimentales y fenómenos de la percepción visual de la forma teniendo en cuenta el procesamiento de la imagen por el mecanismo visual de segundo orden. En particular se va a mostrar cualitativamente por qué la sensibilidad a la modulación de estímulos CM aumenta con la distancia entre la frecuencia espacial de modulación y la frecuencia espacial de la función portadora, por qué la sensibilidad a la modulación es independiente de la orientación relativa entre la función portadora y la moduladora cuando la distancia entre ambas frecuencias es grande, y por qué cuando la distancia en frecuencia es pequeña la sensibilidad a la modulación depende de la orientación relativa entre moduladora y portadora. También este modelo explicará cualitativamente por qué se sigue percibiendo la ilusión de Müller-Lyer en ausencia de bajas frecuencias, y también, cómo se puede percibir la estructura global de una imagen en ausencia de bajas frecuencias espaciales, fenómenos que hasta donde llega mi conocimiento no han sido explicados hasta ahora.

9.2. Mecanismo visual de demodulación del contraste

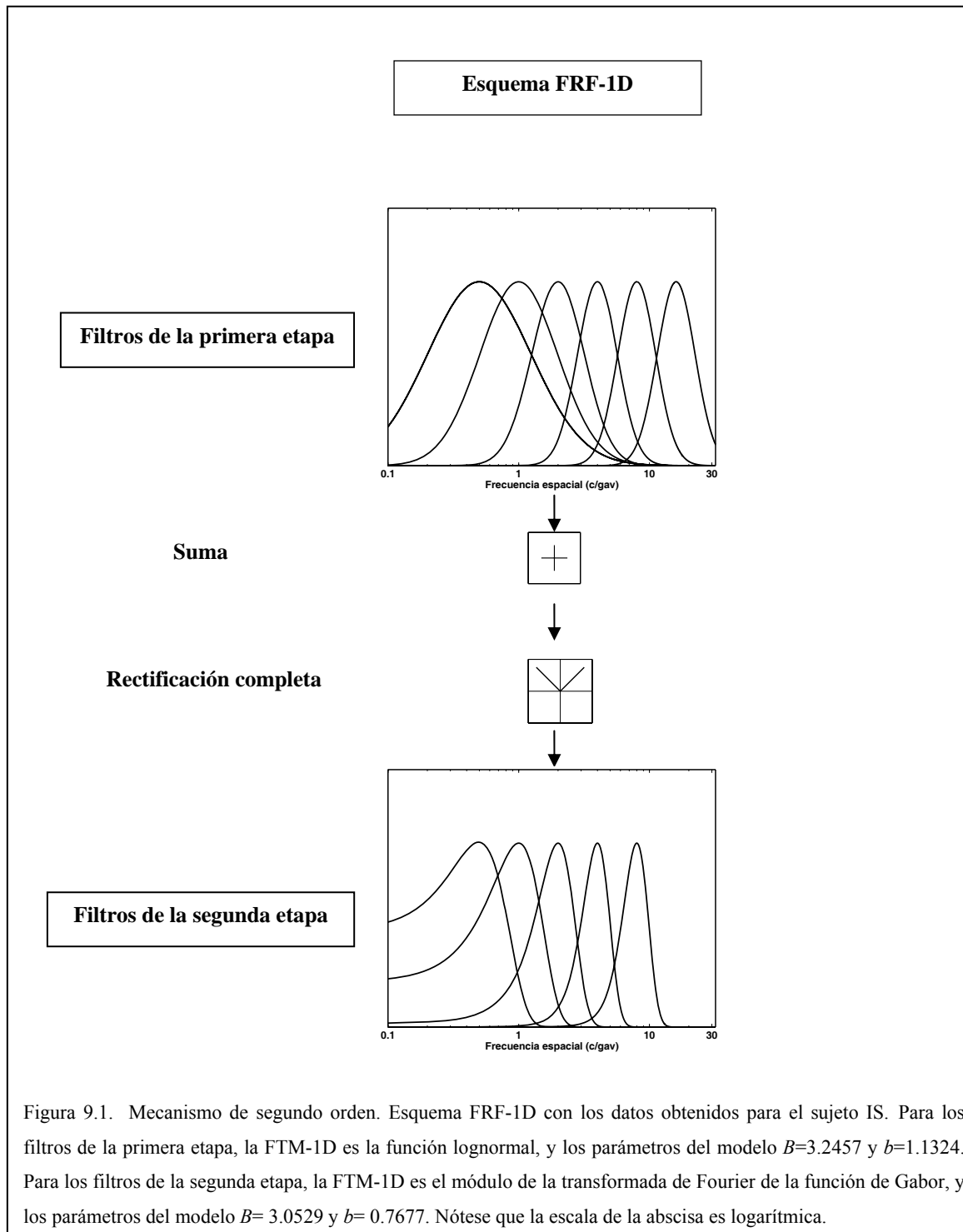
En la Figura 9.1 se muestra el esquema FRF-1D con los resultados obtenidos para el sujeto IS. En particular, para caracterizar los filtros de la primera etapa se han utilizado los resultados obtenidos en el Capítulo 7 con estímulos de primer orden. Para los filtros de la segunda etapa se han utilizado los resultados obtenidos en el Capítulo 8. Como se observa en esta Figura, los filtros de primer orden son simétricos en escala logarítmica (función lognormal), y los filtros de segundo orden son asimétricos en la misma escala (módulo de

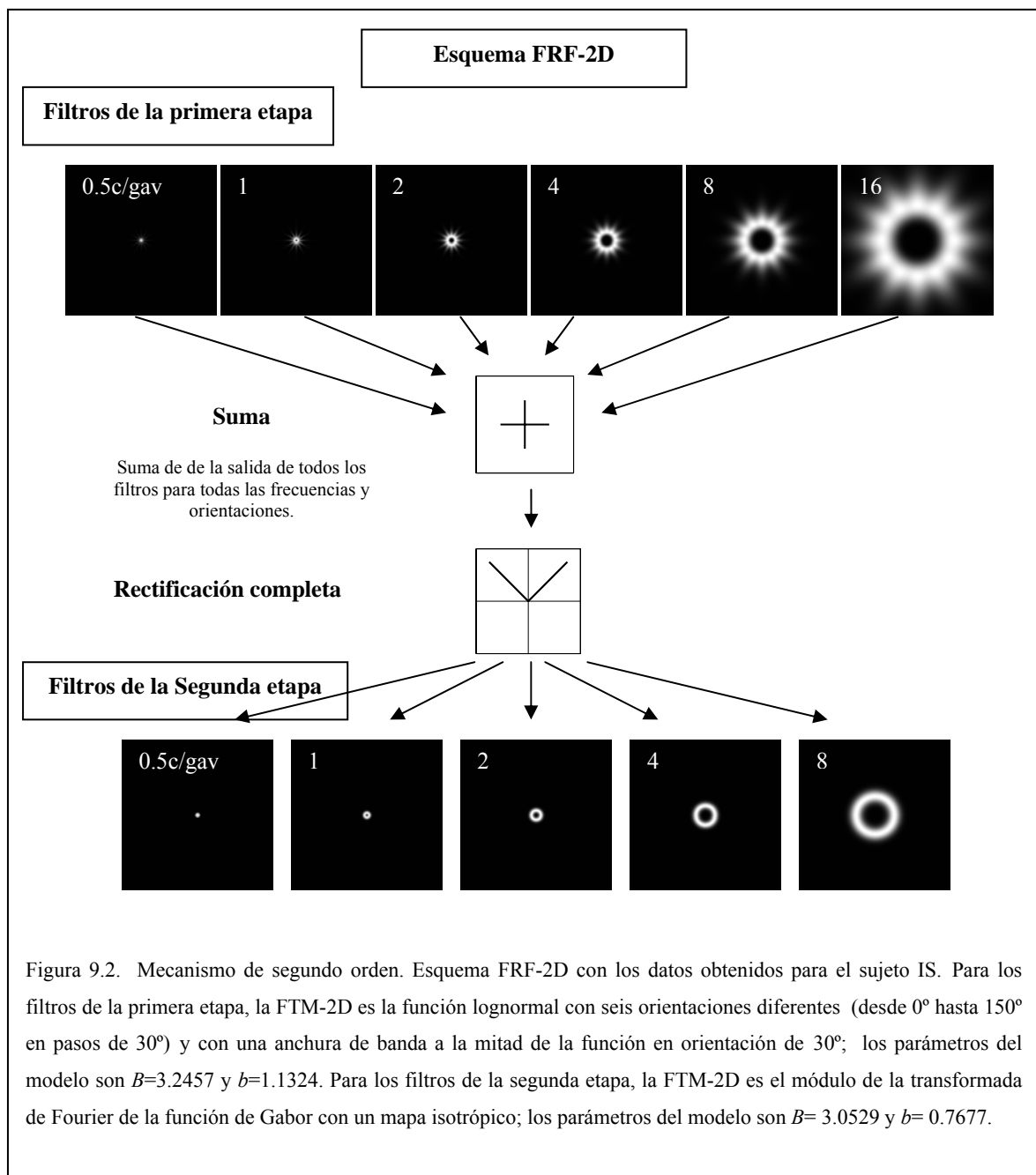
la función de Gabor). Se ha representado un número discreto de canales para facilitar su visualización. Para la primera etapa se han representado filtros con frecuencia de pico desde 0.5 c/gav hasta 16 c/gav en pasos de una octava. Para la segunda etapa se han representado filtros con frecuencia de pico desde 0.5 c/gav hasta 8 c/gav en pasos de una octava. En la Figura 9.2 se muestra la extensión de este esquema FRF a dos dimensiones. Para los filtros de la primera etapa se han utilizado los mismos filtros que en la Figura 9.1 pero con seis orientaciones diferentes (desde 0° hasta 150° en pasos de 30°) y con una anchura de banda a la mitad de la función en orientación de 30° como obtienen Dakin y Mareschal (2000). Para los filtros de la segunda etapa se han utilizado los filtros de la Figura 9.1, pero de un modo isotrópico. Como se ha indicado en la Introducción de este Capítulo, se utilizará el esquema FRF-2D para dar una explicación cualitativa de resultados obtenidos en experimentos psicofísicos, de la ilusión de Müller-Lyer y de los procesos de agrupamiento en ausencia de bajas frecuencias espaciales.

9.3. Explicación cualitativa de resultados experimentales

Explicación del efecto de la distancia espectral entre la frecuencia espacial de modulación y la frecuencia espacial de la función portadora sobre la sensibilidad a la modulación

Ha sido mostrado que la sensibilidad a la modulación del contraste aumenta con la distancia espectral entre la frecuencia de modulación y la frecuencia de la función portadora (Jamar y Koenderink, 1985; Sutter et al., 1995; Dakin y Mareschal, 2000). En particular, se ha encontrado que la sensibilidad a la modulación del contraste es mayor cuando la frecuencia de la portadora es muy superior a la de la modulación (de 8 a 16 veces la frecuencia de modulación; Sutter et al., 1995). En la Figura 9.3 se muestra el proceso para demodular dos de los estímulos utilizados por Sutter et al. (1995), en los que la función portadora es ruido isotrópico paso-banda y la función moduladora es una función de Gabor. Como se observa en esta Figura, cuando la portadora está centrada en una frecuencia relativamente próxima (2 c/gav) a la frecuencia de modulación (0.5 c/gav) (imagen A), la rectificación introduce ruido visual en frecuencias próximas a la frecuencia de modulación, pudiendo estas dificultar su detección. Sin embargo, cuando la frecuencia de la portadora





(8 c/gav) (imagen B) está lejos de la frecuencia de modulación, la rectificación no introduce apenas ruido en las bajas frecuencias, lo que supondría que la sensibilidad a este estímulo fuera mayor. Por tanto, el mecanismo FRF con estos parámetros predice que la sensibilidad a la función moduladora en imágenes CM con portadora ruido isotrópico paso-banda mejora con el aumento de la frecuencia central del ruido, explicando así cualitativamente los resultados de Sutter et al. (1995).

Explicación del efecto de la distancia espectral y la orientación relativa entre la función moduladora y la función portadora

También se ha mostrado que la sensibilidad a la modulación del contraste depende de modo conjunto de la distancia espectral entre la frecuencia espacial de la portadora y la de la función moduladora, así como de la distancia relativa entre sus orientaciones. Si la diferencia en frecuencia es grande, la sensibilidad a la modulación es independiente de la orientación de la función portadora (Dakin y Mareschal, 2000; Mussap, 2001); y si la diferencia es pequeña, la sensibilidad es mayor cuando la orientación de la función portadora es ortogonal a la orientación de la función moduladora (Dakin y Mareschal, 2000). Estos datos han sido utilizados para inferir que en el primer caso existe un mapa isotrópico entre los canales de ambas etapas y, en segundo un mapa anisotrópico (Dakin y Mareschal, 2000). En lo que sigue se muestra que un mapa isotrópico es suficiente para explicar esos resultados. En las Figuras 9.4 y 9.5 se muestra el procedimiento para demodular imágenes CM como las utilizadas en los experimentos de Dakin y Mareschal (2000). En la Figura 9.4 puede verse que cuando la diferencia en frecuencia es muy grande entonces, con independencia de la diferencia en orientación entre moduladora y portadora, la salida del rectificado sería similar para ambos estímulos, por lo que resulta intuitivo que la sensibilidad a la modulación será la misma con independencia de la orientación de la portadora. En la Figura 9.5 se observa que cuando la diferencia en frecuencia espacial entre modulación y función portadora es pequeña y además, moduladora y portadora están dispuestas en la misma orientación, la rectificación introduce bastante ruido en las bajas frecuencias, dificultando de este modo la detección de la modulación. Por el contrario, cuando la función portadora es ortogonal a la orientación de la modulación, la rectificación es menos ruidosa (por lo menos en la orientación de la modulación) lo que mejoraría la detección de la modulación. Por lo tanto el esquema FRF propuesto explicaría los resultados sin necesidad de un cambio de mapa.

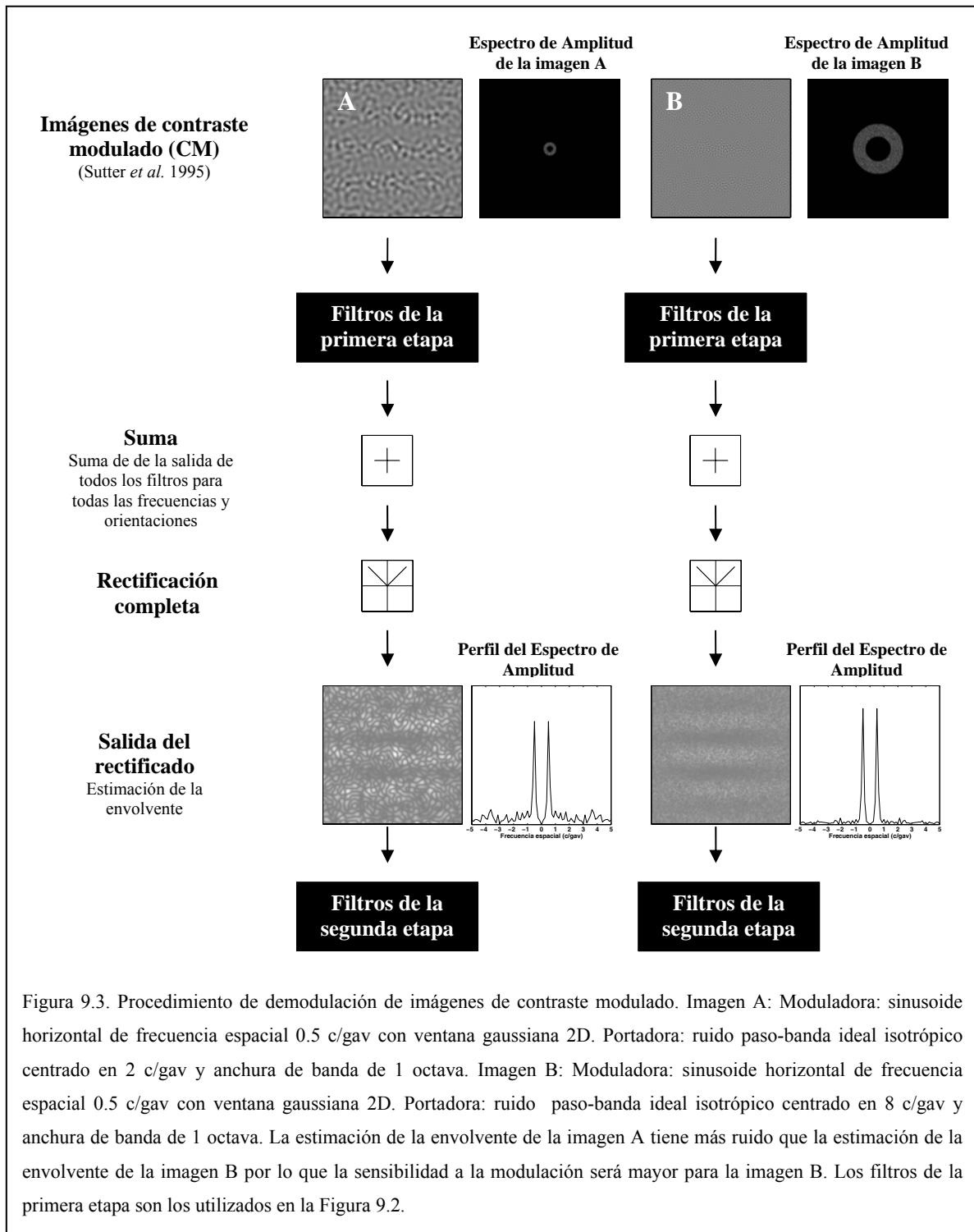


Figura 9.3. Procedimiento de demodulación de imágenes de contraste modulado. Imagen A: Moduladora: senoide horizontal de frecuencia espacial 0.5 c/gav con ventana gaussiana 2D. Portadora: ruido paso-banda ideal isotrópico centrado en 2 c/gav y anchura de banda de 1 octava. Imagen B: Moduladora: senoide horizontal de frecuencia espacial 0.5 c/gav con ventana gaussiana 2D. Portadora: ruido paso-banda ideal isotrópico centrado en 8 c/gav y anchura de banda de 1 octava. La estimación de la envolvente de la imagen A tiene más ruido que la estimación de la envolvente de la imagen B por lo que la sensibilidad a la modulación será mayor para la imagen B. Los filtros de la primera etapa son los utilizados en la Figura 9.2.

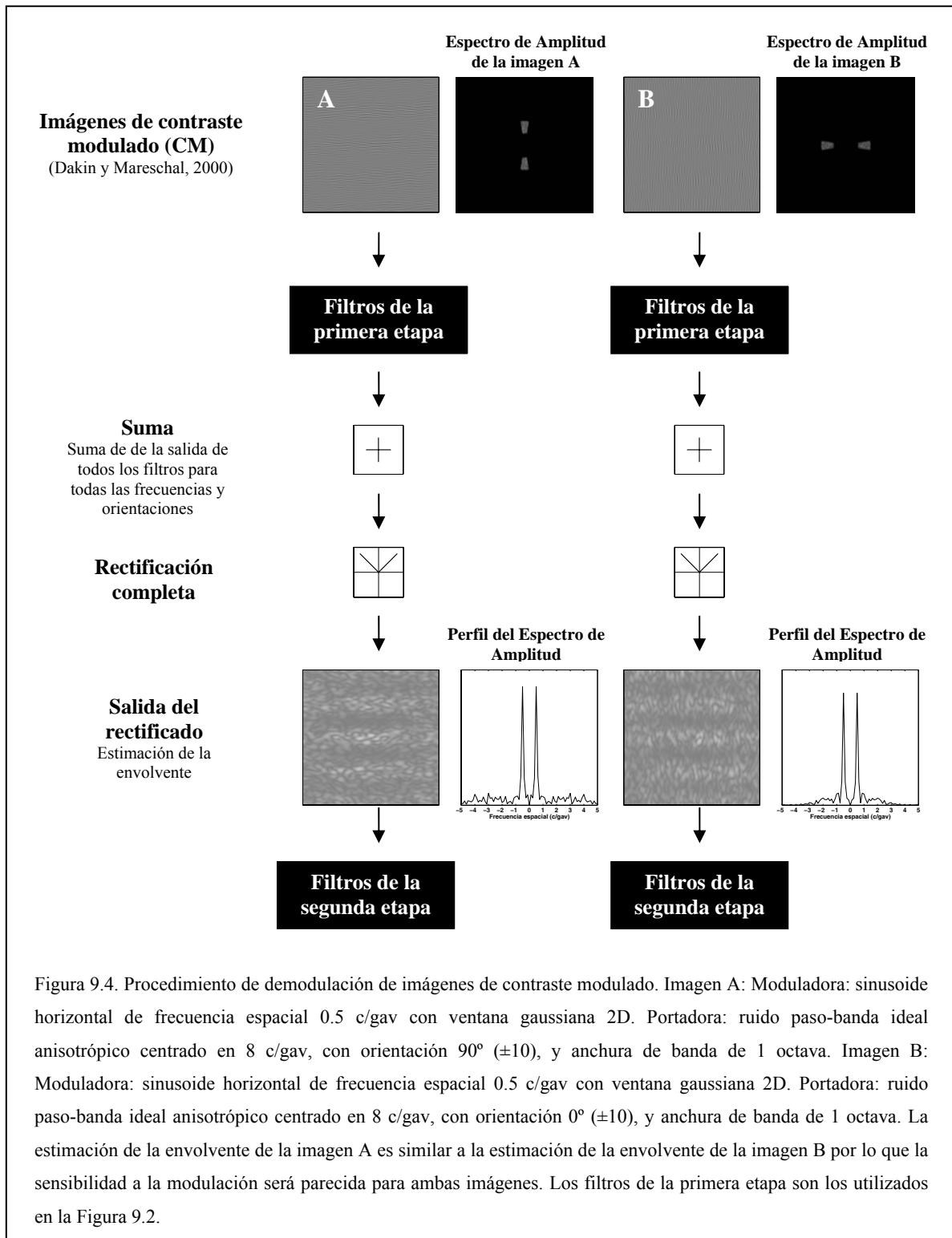


Figura 9.4. Procedimiento de demodulación de imágenes de contraste modulado. Imagen A: Moduladora: senoide horizontal de frecuencia espacial 0.5 c/gav con ventana gaussiana 2D. Portadora: ruido paso-banda ideal anisotrópico centrado en 8 c/gav, con orientación 90° (±10), y anchura de banda de 1 octava. Imagen B: Moduladora: senoide horizontal de frecuencia espacial 0.5 c/gav con ventana gaussiana 2D. Portadora: ruido paso-banda ideal anisotrópico centrado en 8 c/gav, con orientación 0° (±10), y anchura de banda de 1 octava. La estimación de la envolvente de la imagen A es similar a la estimación de la envolvente de la imagen B por lo que la sensibilidad a la modulación será parecida para ambas imágenes. Los filtros de la primera etapa son los utilizados en la Figura 9.2.

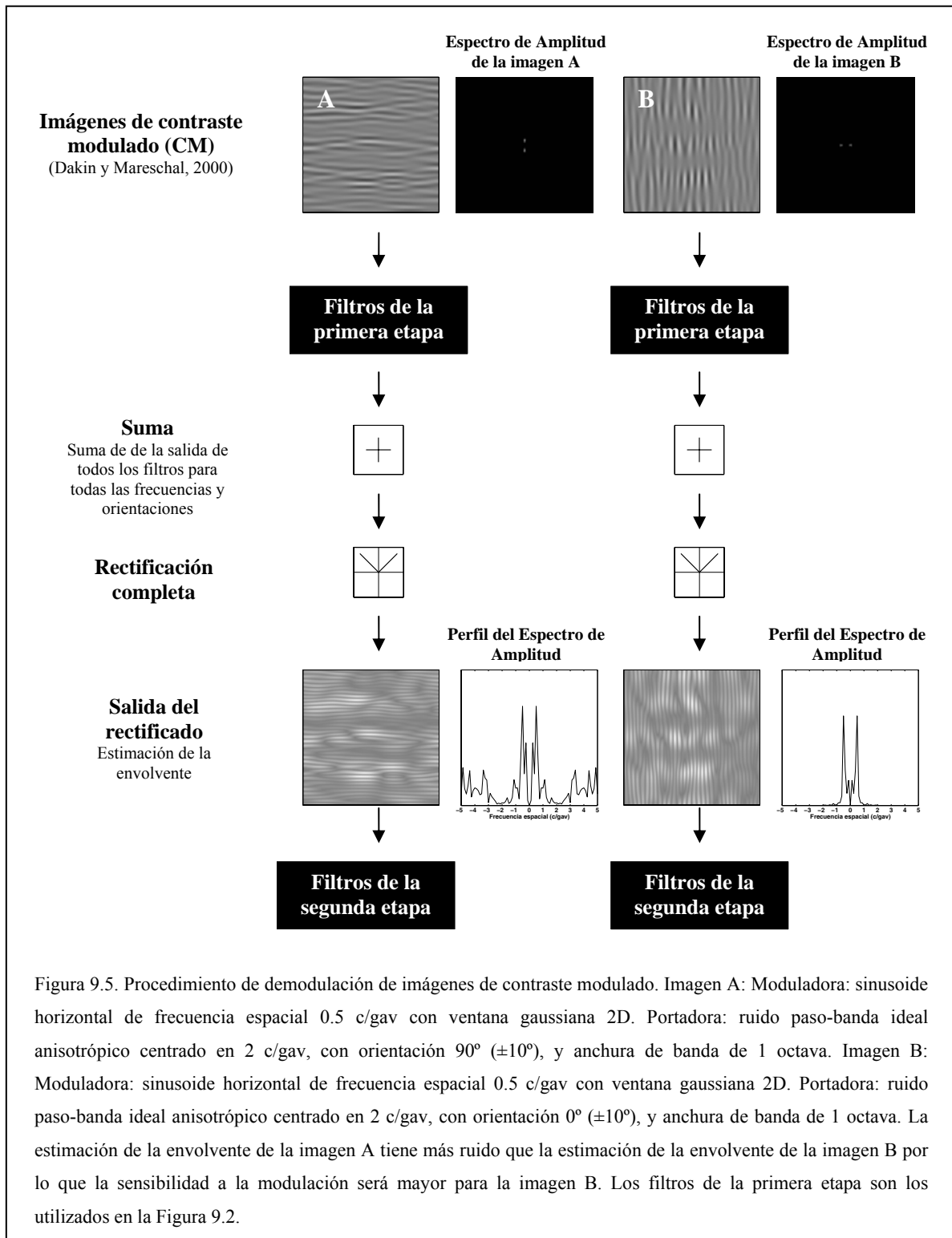


Figura 9.5. Procedimiento de demodulación de imágenes de contraste modulado. Imagen A: Moduladora: senoide horizontal de frecuencia espacial 0.5 c/gav con ventana gaussiana 2D. Portadora: ruido paso-banda ideal anisotrópico centrado en 2 c/gav, con orientación 90° (±10°), y anchura de banda de 1 octava. Imagen B: Moduladora: senoide horizontal de frecuencia espacial 0.5 c/gav con ventana gaussiana 2D. Portadora: ruido paso-banda ideal anisotrópico centrado en 2 c/gav, con orientación 0° (±10°), y anchura de banda de 1 octava. La estimación de la envolvente de la imagen A tiene más ruido que la estimación de la envolvente de la imagen B por lo que la sensibilidad a la modulación será mayor para la imagen B. Los filtros de la primera etapa son los utilizados en la Figura 9.2.

9.4. Explicación de fenómenos de la percepción visual de la forma

Las ilusiones visuales (geométricas y de contraste) y las leyes de gestalt son fenómenos que aún necesitan explicación. En el contexto de la visión espacial una explicación que tiene en cuenta la arquitectura funcional psicofísica del SVH es la de Ginsburg (1978) que argumenta que la aparición de estos fenómenos se debe al procesamiento visual de las bajas frecuencias espaciales de la imagen. Esta explicación falla cuando se trata de explicar la aparición de estos fenómenos en ausencia de bajas frecuencias espaciales.

Este problema ha sido propuesto por Skottun (2000) en lo que respecta a la ilusión de Müller-Lyer y tempranamente por Jáñez (1984) en lo que respecta al fenómeno de agrupamiento perceptivo. Una idea reciente es que estos fenómenos pueden ser explicados por la información contenida en la envolvente de su imagen y así ha sido mostrado con diferentes algoritmos de demodulación (Sierra-Vázquez y Serrano-Pedraza, 2003 y 2004; Sierra-Vázquez, Serrano-Pedraza y Luna, 2005), aunque no con modelos psicofísicos. En lo que sigue se propone una explicación cualitativa de estos fenómenos mediante el mecanismo de segundo orden suponiendo un esquema FRF y utilizando los datos experimentales obtenidos en esta Tesis.

Ilusión de Müller-Lyer

La ilusión de Müller-Lyer es una de las ilusiones visuales geométricas de longitud más famosas (Boring, 1942). Existe una gran cantidad de explicaciones acerca de cómo el ser humano percibe esta ilusión. Una de las explicaciones es la de Ginsburg (1978) que sugiere que esta ilusión es transportada físicamente por las bajas frecuencias espaciales de la imagen y que por lo tanto la ilusión puede ser explicada por el procesamiento de los canales de primer orden selectivos a las bajas frecuencias espaciales. Sin embargo hay estudios que muestran cómo esta ilusión sigue percibiéndose aún en imágenes que no poseen bajas frecuencias espaciales (Carlson et al., 1984; Skottun, 2000). Sierra-Vázquez y Serrano-Pedraza (2003, 2004) han mostrado que la envolvente de la imagen de Müller-Lyer es la que lleva físicamente la ilusión.

A continuación se muestra que es posible explicar cómo el ser humano percibe esta ilusión aún en ausencia de bajas frecuencias espaciales teniendo en cuenta el

procesamiento de la imagen de la ilusión por el mecanismo de segundo orden. En la Figura 9.6 se muestra el procesamiento mediante el esquema FRF de una imagen de la ilusión de Müller-Lyer filtrada paso-alto ideal con frecuencia de corte de 8 c/gav (imagen A), cuyo espectro de amplitud (imagen B) carece de bajas frecuencias espaciales. Los filtros de la primera etapa del mecanismo de segundo orden selectivos a bajas frecuencias espaciales no darían respuesta ante esta imagen. Sólo la salida rectificadora de los filtros selectivos a altas frecuencias espaciales (imagen C) es procesada por los filtros de la segunda etapa del mecanismo de segundo orden, de tal modo que la salida de los filtros de la segunda etapa selectivos a las bajas frecuencias espaciales (imagen D) lleva psicofísicamente la ilusión (tal y como sucede en la salida de los canales de primer orden selectivos a bajas frecuencias espaciales en la imagen original de la ilusión).

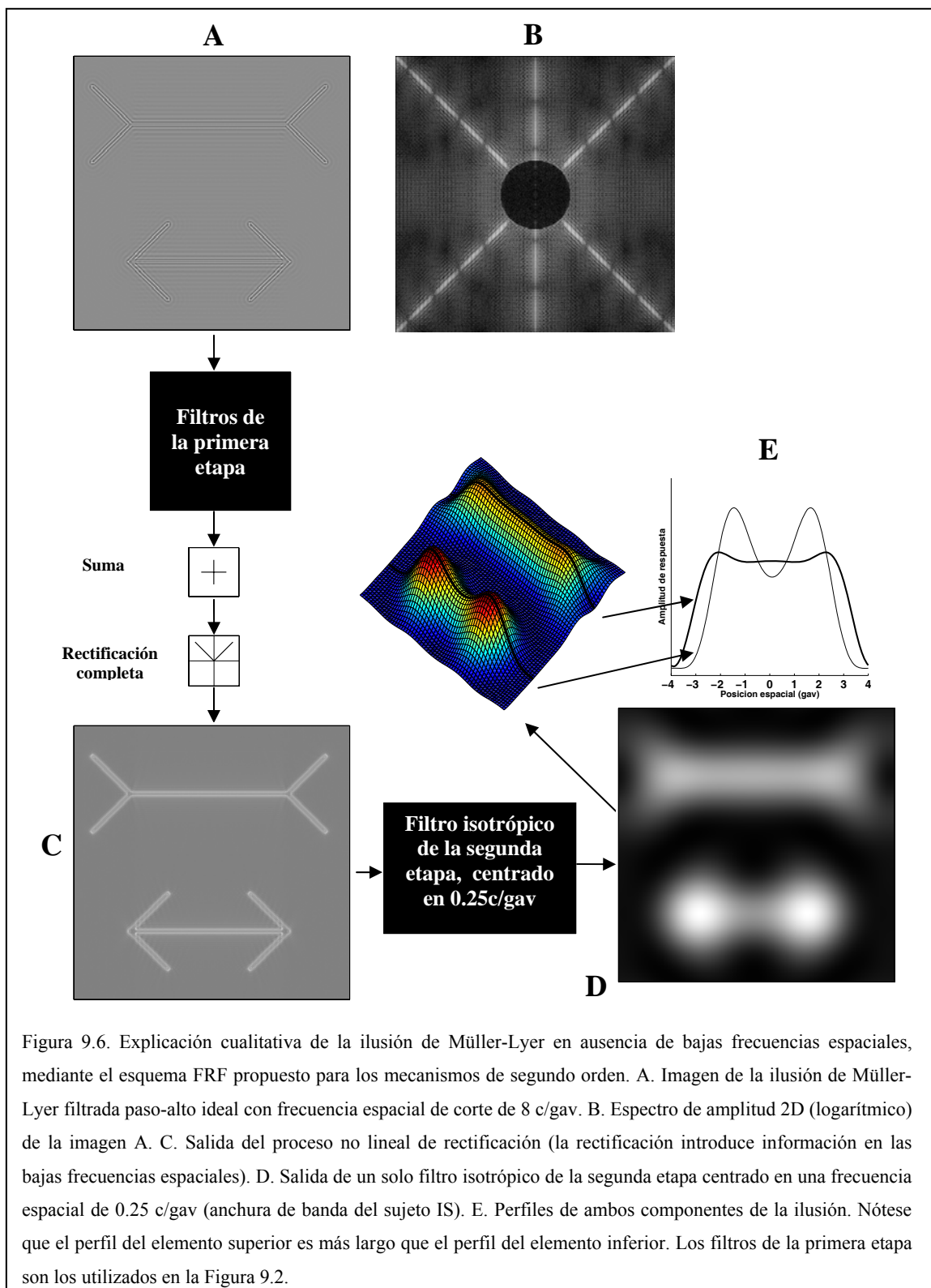


Figura 9.6. Explicación cualitativa de la ilusión de Müller-Lyer en ausencia de bajas frecuencias espaciales, mediante el esquema FRF propuesto para los mecanismos de segundo orden. A. Imagen de la ilusión de Müller-Lyer filtrada paso-alto ideal con frecuencia espacial de corte de 8 c/gav. B. Espectro de amplitud 2D (logarítmico) de la imagen A. C. Salida del proceso no lineal de rectificación (la rectificación introduce información en las bajas frecuencias espaciales). D. Salida de un solo filtro isotrópico de la segunda etapa centrado en una frecuencia espacial de 0.25 c/gav (anchura de banda del sujeto IS). E. Perfiles de ambos componentes de la ilusión. Nótese que el perfil del elemento superior es más largo que el perfil del elemento inferior. Los filtros de la primera etapa son los utilizados en la Figura 9.2.

Agrupamiento perceptivo

El fenómeno de agrupamiento perceptivo, fenómeno ampliamente estudiado por los psicólogos de la Gestalt, consiste agrupar los elementos de una imagen de tal modo que estos se perciben como un todo. Por ejemplo, en la Figura 9.7 se observa una imagen compuesta por un conjunto de cuadrados pequeños con una cierta organización; en esta imagen el ser humano puede ver los cuadrados sin más, pero también puede agrupar sus elementos y percibir la letra U. Este fenómeno, como las ilusiones visuales geométricas, también ha sido explicado por el procesamiento de la imagen por los canales de primer orden sintonizados a bajas frecuencias espaciales (Ginsburg, 1978). Sin embargo, como en el caso de las ilusiones visuales geométricas, el fenómeno de agrupamiento se percibe también en ausencia de bajas frecuencias espaciales (Jáñez, 1984). En la Figura 9.8 (A) se muestra una imagen carente de bajas frecuencias espaciales resultado de filtrar la imagen de la Figura 9.7 con un filtro paso-alto 2D Butterworth isotrópico de orden 4 con frecuencia espacial de corte a la mitad del filtro de 16 c/gav (suponiendo que la imagen subtiende un ángulo visual de 8×8 grados de ángulo visual) (véase su espectro en la Figura 9.8 (B)). Como se puede ver en esa imagen se sigue percibiendo la forma global agrupando sus elementos. Como en el caso de la ilusión de Müller-Lyer, el agrupamiento perceptivo en imágenes que no poseen bajas frecuencias espaciales se puede explicar mediante el procesamiento de éstas por el mecanismo de segundo orden.

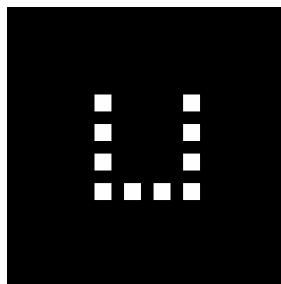


Figura. 9.7. Imagen del fenómeno de agrupamiento perceptivo.

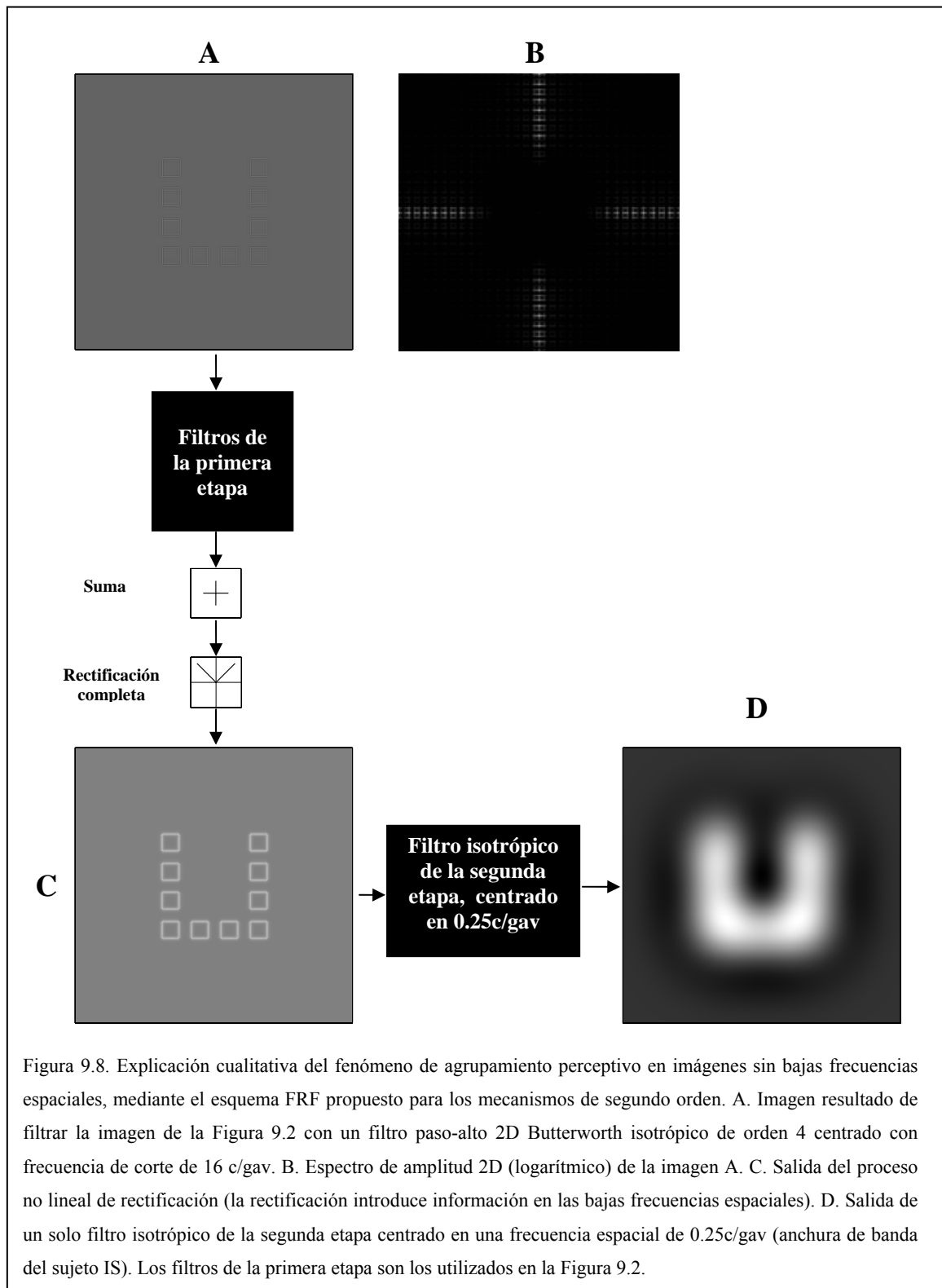


Figura 9.8. Explicación cualitativa del fenómeno de agrupamiento perceptivo en imágenes sin bajas frecuencias espaciales, mediante el esquema FRF propuesto para los mecanismos de segundo orden. A. Imagen resultado de filtrar la imagen de la Figura 9.2 con un filtro paso-alto 2D Butterworth isotrópico de orden 4 centrado con frecuencia de corte de 16 c/gav. B. Espectro de amplitud 2D (logarítmico) de la imagen A. C. Salida del proceso no lineal de rectificación (la rectificación introduce información en las bajas frecuencias espaciales). D. Salida de un solo filtro isotrópico de la segunda etapa centrado en una frecuencia espacial de 0.25c/gav (anchura de banda del sujeto IS). Los filtros de la primera etapa son los utilizados en la Figura 9.2.

En efecto, en la Figura 9.8. (D) se muestra que cuando la imagen es procesada por el mecanismo de segundo orden, son los filtros de la segunda etapa selectivos a las bajas frecuencias espaciales de la salida rectificadora (imagen C) los que agrupan los elementos de la imagen A como un todo, explicando así el fenómeno de agrupamiento.

Capítulo 10

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados experimentales y con los ajustes realizados con el modelo de enmascaramiento basado en bandas críticas, las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- 1) La adopción del modelo de enmascaramiento con ruido visual y modelo de detección con canal variable permite controlar el efecto de off-frequency looking y estimar con precisión las características de los filtros (o canales) del mecanismo de segundo orden.
- 2) Como la función de sensibilidad al contraste (*FSC-ID*) para enrejados sinusoidales, la función de sensibilidad a la modulación sinusoidal del contraste (*FSMC-ID*) de una portadora que es ruido binario 2D tiene una forma paso-banda, de banda ancha. A igualdad de luminancia media, la agudeza visual teórica a la modulación sinusoidal del contraste es, sin embargo, mucho menor que a la modulación sinusoidal de la luminancia y, por tanto, el rango de frecuencias espaciales de modulación de los estímulos CM naturalmente visibles por el ser humano es también mucho menor.
- 3) Mediante un método indirecto (comparación de las sensibilidades a las modulaciones sinusoidales y de onda cuadrada de una señal portadora que es ruido binario 2D) se ha confirmado el supuesto de que los filtros de la segunda etapa del esquema FRF se comportan también, como lo hacen los filtros de primer orden, linealmente (al menos en el umbral de detección).
- 4) Los resultados del enmascaramiento con seis tipos de ruidos máscara (paso-todo, paso-bajo, paso-alto, con muesca espectral, paso-banda y paso-banda doble) en estímulos de primer orden y con un tipo de ruido máscara modulador (paso-banda) en estímulos CM favorecen la hipótesis de existencia de múltiples canales con anchuras de banda relativamente estrecha, solapados en frecuencia espacial tanto para los canales de la primera etapa del mecanismo de segundo orden (hecho suficientemente conocido) como para los canales de la segunda etapa (hecho nuevo y original de esta Tesis).

-
- 5) La forma general de la FTM-1D de los filtros de la primera etapa del esquema FRF se ajusta a la función lognormal, su anchura de banda en octavas decrece con el aumento de la frecuencia de pico del filtro y no es dependiente del nivel del ruido (hechos conocidos aunque discutidos).
 - 6) La forma general de la FTM-1D de los filtros de la segunda etapa del esquema FRF se ajusta de un modo similar a las dos funciones probadas (función gaussiana y función lognormal) y su anchura de banda en octavas también decrece con el aumento de la frecuencia de pico del filtro (hechos nuevos y originales).
 - 7) Las anchuras de banda estimadas para las FTM-1D, a igualdad de frecuencia de pico, de los filtros de la primera y segunda etapa del esquema FRF son similares.
 - 8) Así pues, la arquitectura funcional del banco de canales de la segunda etapa del mecanismo visual de demodulación espacial parece repetir (con ligeras variaciones) la arquitectura funcional de los canales de primer orden, tal y como sucede en audición con los mecanismos sensibles a la envolvente de los sonidos.
 - 9) Resultados experimentales así como fenómenos de la percepción visual de la forma (percepción de ilusiones visuales geométricas y agrupamiento perceptivo en imágenes carentes de bajas frecuencias espaciales) no explicados hasta ahora, pueden explicarse cualitativamente por el procesamiento de las imágenes que los originan mediante el procesamiento por el mecanismo de segundo orden que incorpora los resultados teóricos y experimentales obtenidos en esta Tesis.

APÉNDICES

APÉNDICE 1

En este Apéndice se describen los procedimientos para obtener una función de contraste a partir de una imagen de luminancia, calcular su potencia de contraste, calcular el contraste cRMS (Root Mean Square Contrast) y calcular la densidad espectral de potencia (o nivel) de una imagen.

A.1.1. Función de contraste de una imagen de luminancia

Sea I una imagen digital de dimensiones $NF \times NC$ que adopta valores entre 1 y 255, $1 \leq I(i, j) \leq 255$, $i = 1, 2, \dots, NF$, $j = 1, 2, \dots, NC$. Sean g_x , g_y los grados de ángulo visual (gav) en la dirección horizontal y vertical respectivamente subtendidos por la imagen digital al ser presentada en un monitor. Sean $A = g_x \times g_y$ el área en gav^2 de la imagen y $\Delta x = \frac{g_x}{NC}$, $\Delta y = \frac{g_y}{NF}$, en gav, las longitudes del píxel de la imagen en dirección horizontal y vertical respectivamente. La imagen digital $I(i, j)$ se transforma en una imagen discreta $I(x\Delta x, y\Delta y)$, $x = -NC/2, \dots, (NC-1)/2$, $y = -NF/2, \dots, (NF-1)/2$. En lo que sigue, y por claridad las longitudes del píxel serán eliminadas.

La *función de contraste* correspondiente a la imagen I , f , es

$$f(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0} - 1, \quad -1 \leq f(x, y) \leq 1, \quad I_0 = 128.$$

Sea L la *imagen de luminancia* presentada en la pantalla,

$$L(x, y) = L_0(1 + mf(x, y)), \quad L_{\min} \leq L(x, y) \leq L_{\max},$$

donde L_0 es la luminancia media de la pantalla en cd/m^2 , L_{\min} es la luminancia mínima,

L_{\max} es la luminancia máxima y m es el contraste de Michelson, $m = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$.

La *media de las luminancias*, L_{med} , de la imagen de luminancia L se define así

$$L_{med} = \frac{\sum_{x=-NC/2}^{(NC-1)/2} \sum_{y=-NF/2}^{(NF-1)/2} L(x, y) \Delta x \Delta y}{A},$$

en lo que sigue se omitirán los límites de la suma.

Finalmente, la *función de contraste correspondiente a la imagen de luminancia* L , l , se define del siguiente modo,

$$l(x, y) = \left[\frac{L(x, y)}{L_{med}} - 1 \right].$$

[Nótese que esta función de contraste está sin dimensionar].

A.1.2. Potencia de contraste de una imagen o potencia promedio

Se llama *energía de contraste* de una imagen de luminancia, E_C , a la energía de su función de contraste. Formalmente,

$$E_C = \sum \sum l^2(x, y) \Delta x \Delta y,$$

donde la unidad de medida de la energía de contraste viene expresada en gav^2 .

Se llama *potencia de contraste* de una imagen de luminancia, P_C , a la energía de contraste que contiene la señal en un gav^2 , es decir

$$P_C = \frac{E_C}{A} = \frac{1}{A} \sum \sum l^2(x, y) \Delta x \Delta y,$$

donde la potencia de contraste no está dimensionada. Nótese que la potencia de contraste de una imagen de luminancia L es la media de su función de contraste al cuadrado.

A.1.3. Contraste RMS (Root Mean Square Contrast) de una imagen (cRMS)

El contraste cRMS se define como la raíz cuadrada de la potencia de contraste de una imagen. Es decir,

$$\text{cRMS} = \sqrt{P_C}.$$

El cRMS de una imagen no está dimensionado. La formula desarrollada es

$$\text{cRMS} = \sqrt{\frac{\sum \sum l^2(x, y) \Delta x \Delta y}{A}}.$$

Formulas alternativas son las siguientes:

$$\text{cRMS} = \sqrt{\frac{E_C}{A}}$$

y

$$cRMS = \frac{\sigma_L}{L_{med}} \text{ (Stromeyer y Julesz, 1972),}$$

donde σ_L es la desviación típica de las luminancias de la imagen.

A.1.4. Nivel de potencia de una imagen de ruido 1D equienergético (N_0)

El *espectro de potencia* o *espectro de densidad de potencia* de una función cualquiera es la transformada de Fourier de la función de la autocorrelación de esa función. En el caso de ruido 1D equienergético (que es el utilizado en este trabajo como ruido máscara) es posible simplificar la definición anterior. En efecto, sea una imagen digital de ruido 1D con espectro equienergético dentro de una banda unilateral de frecuencias espaciales, W , en c/gav. Entonces su densidad espectral de potencia es idénticamente igual a un valor constante N_0 dentro de esa banda, valor que recibe el nombre de *nivel del ruido*. El *nivel de potencia* de un determinado ruido equienergético se calcula del siguiente modo

$$N_0 = \frac{P_C}{2W} \text{ (Green y Swets, 1974, pp. 386),}$$

puesto que P_C no está dimensionada, la unidad de medida de N_0 es $(c/gav)^{-1}$.

Es trivial mostrar que el nivel del ruido está relacionado con el cRMS por la siguiente fórmula

$$N_0 = \frac{cRMS^2}{2W}.$$

APÉNDICE 2

En este Apéndice se muestra el procedimiento para calcular el contraste m que ha de tener una imagen para que ésta tenga un determinado cRMS. Conocer el contraste es en nuestro caso necesario, ya que cuando se utiliza ruido visual, cada muestra (imagen de ruido) normalizada tiene una potencia de contraste diferente. Por ello, si se desea que todas las muestras estén igualadas en nivel, es necesario conocer el contraste m preciso para conseguir el cRMS correspondiente a ese nivel. En este Apéndice también se muestra cómo manipular el contraste de una imagen conservando todos los niveles de gris de la imagen.

A.2.1. Cálculo del contraste m de una imagen para obtener un determinado cRMS

Sea I una imagen digital de dimensiones $N \times N$ que adopta valores entre 1 y 255, $1 \leq I(x, y) \leq 255$. Sea f la función de contraste de la imagen digital

$$f(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0} - 1, \quad -1 \leq f(x, y) \leq 1, \quad I_0 = 128.$$

Sea L la imagen de luminancia presentada en la pantalla y que subtiende $g_x \times g_y$ gav^2

$$L(x, y) = L_0(1 + mf(x, y)),$$

donde L_0 , en cd/m^2 es la luminancia media con la que se presenta la imagen en la pantalla y que corresponde al valor I_0 de la imagen, y m es el contraste de Michelson, $m \in [0, 1]$,

$$m = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}},$$

(L_{\min} es la luminancia mínima; L_{\max} es la luminancia máxima). Sea L_{med} la media de las luminancias de la imagen.

$$L_{\text{med}} = \frac{\sum \sum L(x, y) \Delta x \Delta y}{A}.$$

Sea l la función de contraste de la imagen de luminancia L . Entonces el contraste m para que la imagen de luminancia L tenga un cRMS dado se calcula así

$$m = \frac{I_0 \text{cRMS}}{\sqrt{a - b^2 + \text{cRMS}(I_0 - b)}},$$

donde

$$a = \frac{\sum \sum I^2(x, y)}{N^2} \quad y \quad b = \frac{\sum \sum I(x, y)}{N^2}.$$

Demostración

Sea l la función de contraste de la imagen L

$$l(x, y) = \left[\frac{L(x, y)}{L_{med}} - 1 \right].$$

El cRMS de la imagen L es

$$cRMS = \sqrt{\frac{\sum \sum |l(x, y)|^2 \Delta x \Delta y}{A}},$$

y su potencia es

$$cRMS^2 = \frac{\Delta x \Delta y}{A} \sum \sum |l(x, y)|^2,$$

$$\text{donde} \quad \frac{\Delta x \Delta y}{A} = \frac{\frac{gx}{N} \times \frac{gy}{N}}{gx \times gy} = \frac{1}{N \times N}.$$

Sustituyendo l por su definición en la fórmula del $cRMS^2$ y simplificando se obtiene

$$cRMS^2 = \frac{1}{N^2} \sum \sum |l(x, y)|^2 = \frac{1}{N^2} \sum \sum \left[\frac{L(x, y)}{L_{med}} - 1 \right]^2.$$

Sustituyendo L_{med} por su definición, es fácil demostrar que

$$cRMS^2 = N^2 \frac{\sum \sum L(x, y)^2}{\left[\sum \sum L(x, y) \right]^2} - 1.$$

Sustituyendo L por su definición en esta expresión se obtiene

$$cRMS^2 = N^2 \frac{\sum \sum [L_0 (1 + mf(x, y))]^2}{\left[\sum \sum L_0 (1 + mf(x, y)) \right]^2} - 1.$$

Desarrollando esta expresión y pasando por los siguientes cálculos tediosos

$$cRMS^2 = \frac{\sum \sum [L_0(1 + mf(x, y))]^2 - \frac{\left[\sum \sum L_0(1 + mf(x, y)) \right]^2}{N^2}}{\left[\frac{\sum \sum L_0(1 + mf(x, y))}{N^2} \right]^2},$$

$$cRMS^2 = \frac{\sum \sum \left[1 + m \left(\frac{I(x, y)}{I_0} - 1 \right) \right]^2 - \frac{\left[\sum \sum \left[1 + m \left(\frac{I(x, y)}{I_0} - 1 \right) \right] \right]^2}{N^2}}{\left[\frac{\sum \sum \left[1 + m \left(\frac{I(x, y)}{I_0} - 1 \right) \right]}{N^2} \right]^2},$$

$$cRMS^2 = \frac{\frac{m^2}{I_0^2} \left[\sum \sum I(x, y)^2 - \frac{\left[\sum \sum I(x, y) \right]^2}{N^2} \right]}{\left[\frac{\sum \sum \left[1 + m \left(\frac{I(x, y)}{I_0} - 1 \right) \right]}{N^2} \right]^2},$$

Se obtiene

$$cRMS = \frac{\sqrt{\frac{\sum \sum I^2(x, y)}{N^2} - \left[\frac{\sum \sum I(x, y)}{N^2} \right]^2}}{I_0 \left(\frac{1}{m} - 1 \right) + \frac{\sum \sum I(x, y)}{N^2}}.$$

Haciendo

$$a = \frac{\sum \sum I^2(x, y)}{N^2}$$

y

$$b = \frac{\sum \sum I(x, y)}{N^2},$$

se obtiene

$$\text{cRMS} = \frac{\sqrt{a - b^2}}{I_0 \left(\frac{1}{m} - 1 \right) + b}.$$

Y por último, despejando m se obtiene

$$m = \frac{I_0 \text{cRMS}}{\sqrt{a - b^2} + \text{cRMS}(I_0 - b)}.$$

[Nótese que tanto el cRMS como m son independientes de la luminancia media L_0 . Nótese además que el valor de m no sólo depende del valor del cRMS sino que también depende de la imagen digital en particular. En consecuencia, para distintas imágenes digitales con el mismo cRMS, pueden existir diferentes valores para m]

A.2.2. Control del contraste m de una imagen

La presentación en la pantalla y el control del contraste de una imagen en los experimentos se ha realizado utilizando la tarjeta VSG2/3F número 4a (Cambridge Research Systems Ltd, Reino Unido). Esta tarjeta gráfica proporciona 2^{15} niveles de gris (32768 niveles distintos de luminancia, desde la luminancia mínima hasta la luminancia máxima).

Para presentar una imagen en la pantalla, es necesario realizar los siguientes pasos:

- (i) Crear una imagen digital I que adopte valores entre 1 y 255, $1 \leq I(x, y) \leq 255$.
- (ii) Convertir la imagen digital I en una función de contraste f ,

$$f(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0} - 1,$$

donde $-1 \leq f(x, y) \leq 1$, y el parámetro I_0 es el nivel de gris correspondiente a la luminancia media (L_0) de la pantalla ($I_0 = 128$)

(iii) Transformar la función de contraste f en una función de luminancia L . Para ello se asigna a cada nivel de gris de la imagen digital el nivel de luminancia correspondiente, que dependerá del contraste m . La imagen L que aparece en la pantalla es

$$L(x, y) = L_0(1 + mf(x, y)), \quad (\text{A.2.1})$$

para $L_{\min} \leq L(x, y) \leq L_{\max}$ y $m \in [0, 1]$,

donde L_0 y m se han definido antes.

Nótese que cuando se manipula el contraste m de una imagen digital no se pierden niveles de gris de la imagen ni se alteran los valores de la imagen digital. Lo que cambia es la asignación de luminancias a los niveles de gris (1-255) (véase la Figura A.2.2). La transformación de niveles de gris de la imagen en luminancias se realiza mediante las LUT del sistema gráfico VSG2/3.

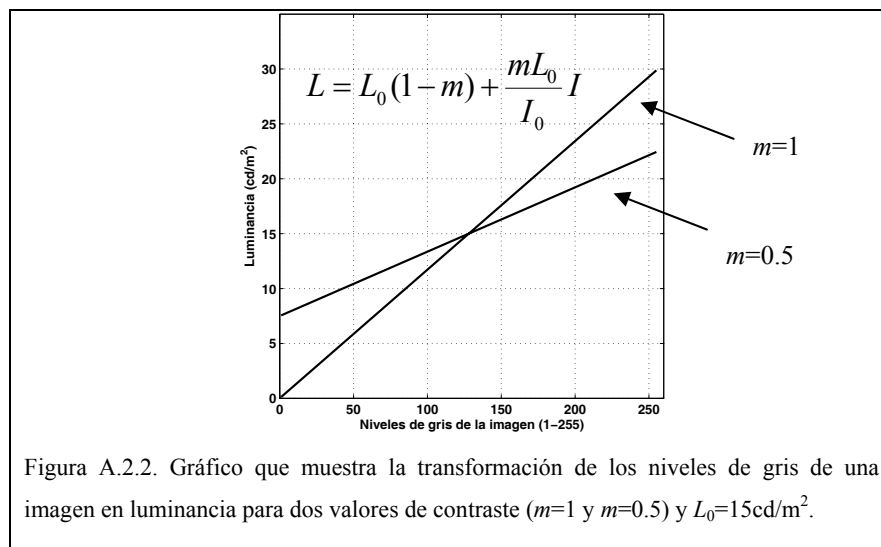


Figura A.2.2. Gráfico que muestra la transformación de los niveles de gris de una imagen en luminancia para dos valores de contraste ($m=1$ y $m=0.5$) y $L_0=15\text{cd/m}^2$.

APÉNDICE 3

En este Apéndice se muestra el procedimiento para generar los diferentes tipos de ruido utilizados en los experimentos de enmascaramiento. También se muestra el procedimiento utilizado para generar el ruido binario 2D que actúa como función portadora de los estímulos CM en los experimentos de segundo orden.

A.3.1. Generación de ruido equienergético 1D y control de su nivel

En los experimentos de enmascaramiento se han utilizado seis tipos de ruido 1D máscara, ruido blanco (paso-todo), paso-bajo, paso-alto, paso-todo con muesca espectral, paso-banda y paso-banda doble. Antes de especificar las características de estos tipos de ruido se estudia la generación de ruido equienergético y el control de su nivel.

Generación de ruido 1D equienergético en una banda de frecuencias

Existen diferentes algoritmos para generar ruido equienergético dentro de una banda de frecuencias. Estos algoritmos se pueden clasificar en dos grupos: los que operan directamente en el dominio del espacio, y los que operan en el dominio de la frecuencia. En el primer caso se suele generar ruido blanco y después se filtra para seleccionar la banda de frecuencias espaciales deseada. Un procedimiento para generar ruido blanco en el dominio del espacio puede verse en Green y Swets (1974, pp. 388 a 389), otro diferente puede verse en Pelli y Farell (1999, p. 653 nota 14). En el segundo caso, que es el seguido en esta Tesis, se selecciona la banda de frecuencias en el dominio de Fourier y se transforma al dominio espacial.

A continuación se muestran los pasos seguidos en esta Tesis para la construcción de ruido equienergético:

- (i) Generación del módulo de la transformada de Fourier del ruido en una determinada orientación (el ruido 1D utilizado en los experimentos tiene orientación horizontal). El módulo utilizado es equienergético, es decir, es uniforme dentro de un rango de frecuencias espaciales W especificado. En este paso es donde se generan las diferentes composiciones espectrales que determinan el tipo de ruido (con muesca espectral, paso-alto, paso-bajo, paso-banda y paso-banda doble).

- (ii) Generación del espectro de fase del ruido. La fase es aleatoria, está uniformemente distribuida dentro del rango $(-\pi \leq \theta \leq \pi)$, y dentro de un rango de frecuencias espaciales W especificado. Los números aleatorios para generar la fase fueron obtenidos mediante el método de Wichmann y Hill (1982).
- (iii) Una vez que generado el módulo y la fase, se obtiene una señal de ruido en el dominio espacial mediante la transformada inversa de Fourier utilizando el algoritmo FFT inversa 2D que proporciona el programa MATLAB (rutina IFFT2) (esta rutina proporcionó resultados idénticos a las rutinas C06FUF y C06GCF de las librerías NAG).
- (iv) La señal de ruido obtenida se normaliza para que adopte valores entre 1 y 255, $(1 \leq I(x, y) \leq 255)$.

Procedimiento para generar ruido con una determinada densidad espectral de potencia o nivel de potencia

Una vez generada la imagen I se desea presentar en pantalla esta imagen con un determinado nivel N_0 . Para ello, se calcula el cRMS correspondiente al nivel del ruido mediante la fórmula

$$\text{cRMS} = \sqrt{N_0 2W},$$

donde el valor de W se corresponde con el rango de frecuencias espaciales del espectro equienergético. A continuación se calcula el contraste m_r del ruido necesario para obtener ese cRMS mediante la fórmula

$$m_r = \frac{I_0 \text{cRMS}}{\sqrt{a - b^2 + \text{cRMS}(I_0 - b)}},$$

donde a y b están definidos en el Apéndice A.2.1. De modo que al presentar en pantalla la imagen digital del ruido con el contraste m_r (véase la ecuación (A.2.1)), éste posee el nivel N_0 deseado. Ahora bien, el contraste m_r de una imagen de un determinado ruido depende en particular de la muestra de ruido y, por lo tanto cada imagen necesitará un contraste diferente para un mismo cRMS.

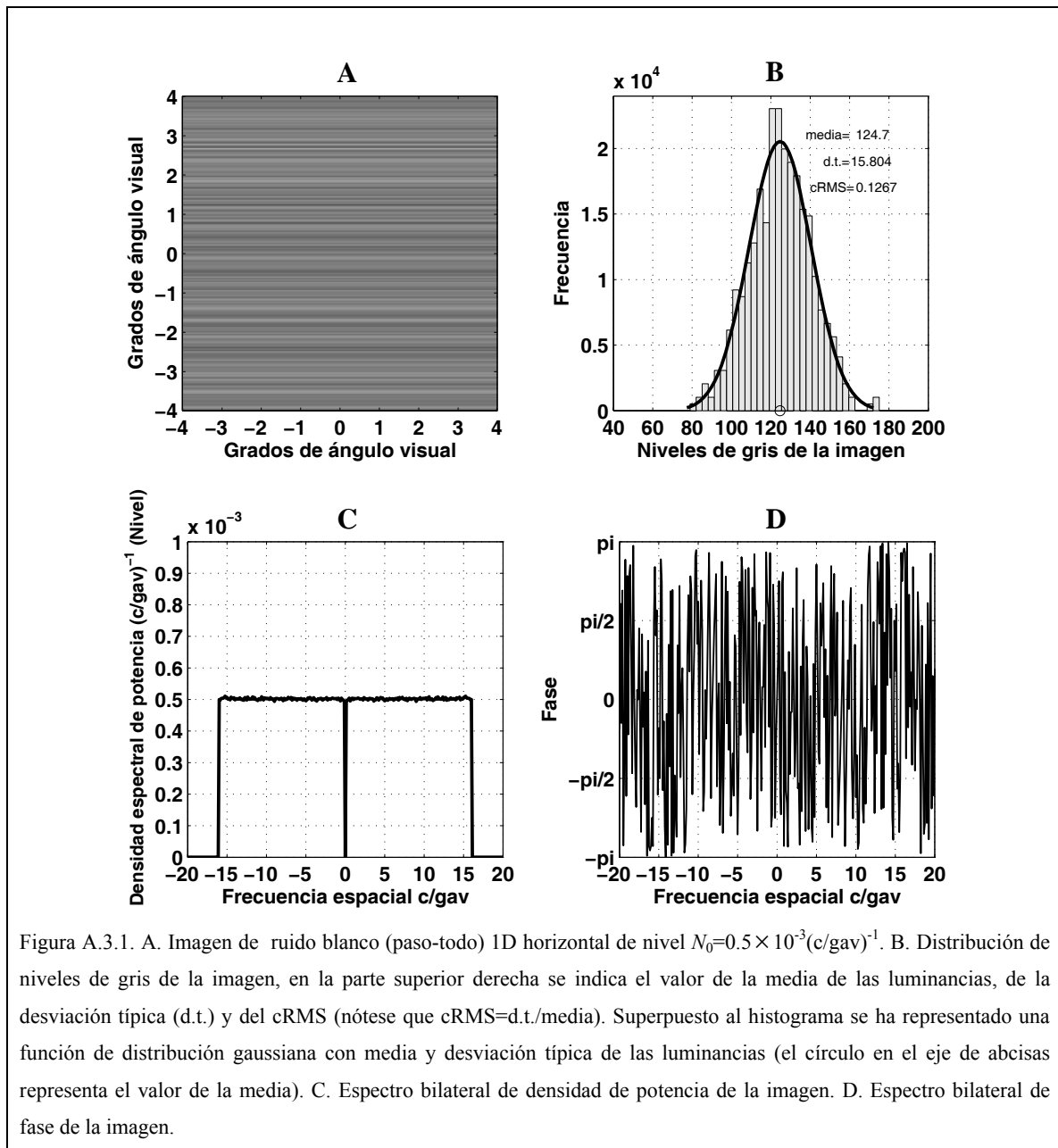
A.3.1.1. Ruido blanco 1D (ruido paso-todo o de banda ancha 1D)

Las características del ruido blanco 1D o ruido paso-todo (horizontal) son:

- a) Está compuesto por todas las frecuencias espaciales visibles.
- b) Su espectro es equienergético.
- c) La fase está aleatorizada y uniformemente distribuida dentro del rango $(-\pi \leq \theta \leq \pi)$.
- d) Los niveles de luminancia de la imagen se distribuyen de modo gaussiano, por lo que a este ruido también se le denomina ruido blanco gaussiano (Stromeyer y Julesz, 1974, p. 1223).

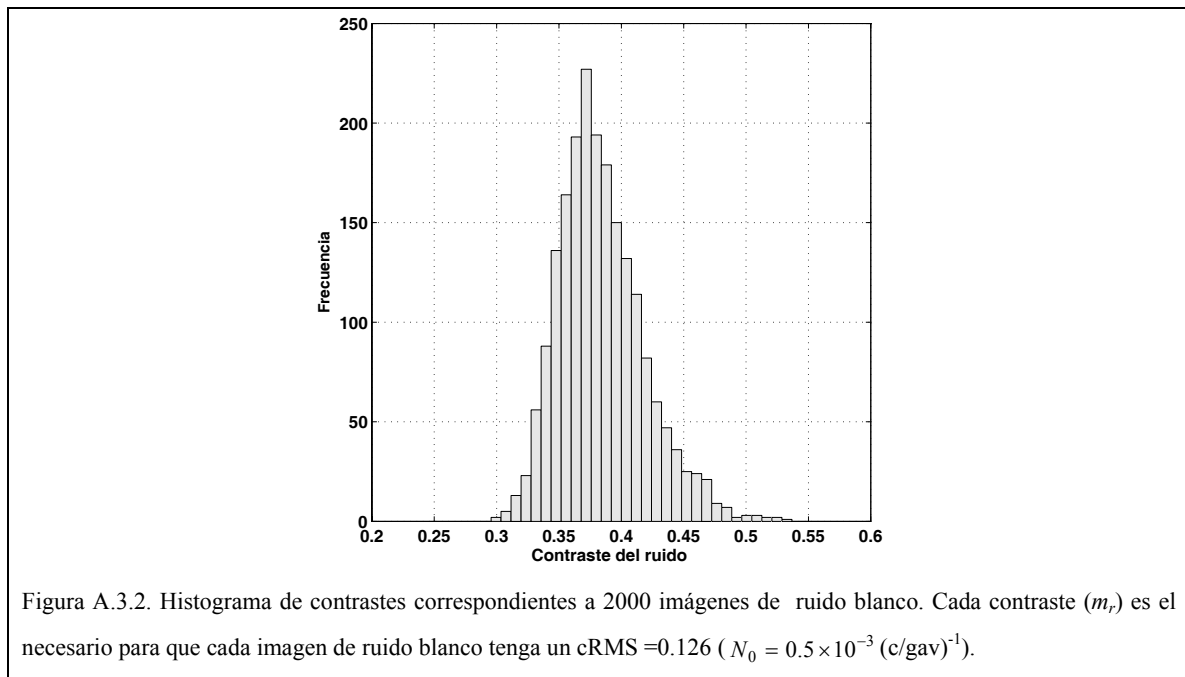
En la práctica es imposible generar ruido blanco que cumpla estrictamente todas las características, ya que, por ejemplo cuando se trabaja con imágenes digitales no siempre es posible generar ruido compuesto por todas las frecuencias espaciales visibles. En el caso de imágenes digitales, la generación de ruido blanco ya sea 1D como 2D se complica porque la máxima frecuencia del ruido viene determinada por el límite Nyquist, que en nuestro caso es de 32 c/gav y la mínima frecuencia viene dada por la frecuencia de muestreo en el dominio espectral $\Delta\nu = 2 \times 32 / 512 = 0.125$ c/gav. Por lo tanto, generamos pseudo ruido blanco ya que por la limitación física de las imágenes digitales tenemos ruido blanco filtrado paso-banda dentro del rango 0.125-32 c/gav. Ahora bien, puesto que para nuestro propósito lo importante es que el ruido sea blanco para el filtro (o canal) que queremos medir, se ha considerado suficiente un ruido paso-banda dentro del rango 0.125-16 c/gav, $W=15.875$ c/gav, ya que las frecuencias centrales de los canales que vamos a medir están suficientemente alejadas de estas frecuencias de corte mínima y máxima del ruido blanco.

A continuación se muestra un ejemplo donde se genera ruido blanco 1D con $N_0 = 0.5 \times 10^{-3}$ (ciclos/gav)⁻¹. Para ello es necesario calcular primero su cRMS $cRMS = \sqrt{0.5 \times 10^{-3} \times 2 \times 15.875} = 0.126$. Una vez calculado el cRMS que debe tener el ruido blanco 1D para conseguir ese nivel, necesitamos calcular el contraste m_r con el que hay que presentar la imagen del ruido en pantalla. En la Figura A.3.1 (A) puede verse una imagen de ruido blanco 1D con el contraste m_r necesario para que la imagen digital tenga un cRMS=0.126. La función de autocorrelación 1D para las imágenes de ruido blanco 1D generadas sólo tiene valor significativo en $\nu = 0$ (Papoulis, 1968, pp. 269) indicando que los niveles de gris son estocásticamente independientes. [Esto mismo sucede con la



generación del ruido blanco directamente en el dominio del espacio con la diferencia de que con nuestro procedimiento el nivel no cambia con la imagen muestra de ruido, mientras que con este otro procedimiento el nivel se distribuye de modo gaussiano con media igual al nivel elegido (resultado no mostrado)].

En la Figura A.3.1 (B) se muestra la distribución de sus niveles de gris (obsérvese el ajuste que la función gaussiana superpuesta coincide con la forma del histograma). Las

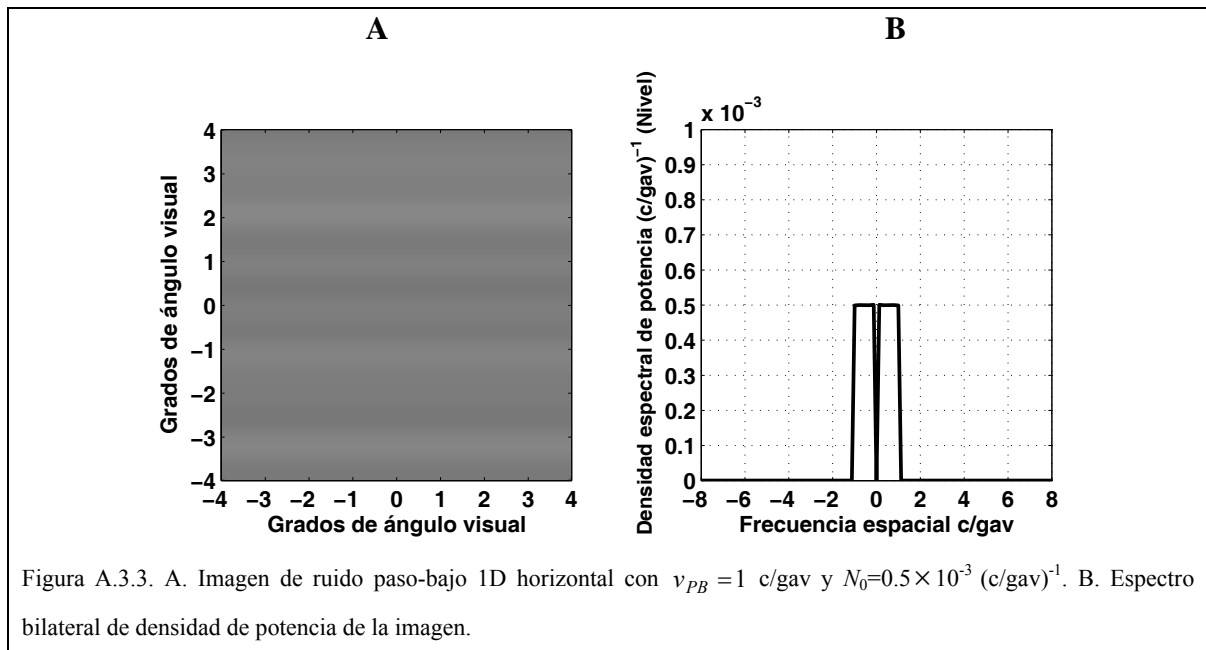


gráficas del espectro de densidad de potencia y el espectro de fase de la imagen del ruido blanco 1D se muestran en las Figuras A.3.1 (C) y (D), respectivamente.

Como se ha indicado, el contraste m_r de una imagen de ruido blanco 1D depende de la muestra de ruido, por lo que cada imagen necesitará un contraste diferente para un mismo $cRMS$. En la Figura A.3.2 se puede ver un histograma de contrastes correspondientes a 2000 imágenes de ruido blanco (con rango de frecuencias espaciales entre $\nu \geq 0.125$ y $\nu \leq 16$ c/gav). Cada contraste es el necesario para que la imagen de ruido generada tenga un $cRMS = 0.126$.

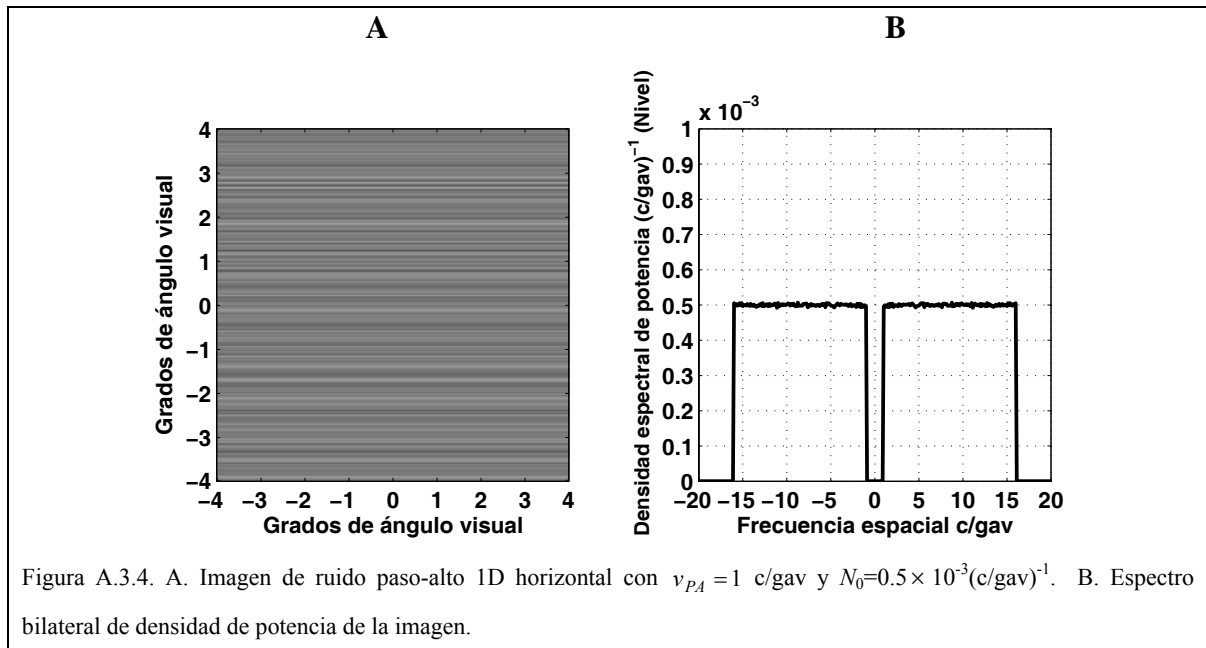
A.3.1.2. Ruido blanco 1D filtrado paso-bajo ideal

El espectro de potencia del ruido paso-bajo horizontal es uniforme dentro del rango de frecuencias $0.125 - \nu_{PB}$ c/gav, donde ν_{PB} es la frecuencia de corte ($W = \nu_{PB} - 0.125$). En la Figura A.3.3 se muestra un ejemplo de este tipo de ruido junto con su espectro de densidad de potencia.



A.3.1.3. Ruido blanco 1D filtrado paso-alto ideal

El espectro de potencia del ruido paso-alto horizontal es uniforme dentro del rango de frecuencias $\nu_{PA} - 16$ c/gav, donde ν_{PA} es la frecuencia de corte ($W = 16 - \nu_{PA}$). En la Figura A.3.4 se muestra un ejemplo de este tipo de ruido junto con su espectro de densidad de potencia.



A.3.1.4. Ruido blanco 1D con muesca espectral ideal

El espectro de potencia del ruido blanco con muesca espectral horizontal es uniforme dentro del rango de frecuencias $0.125 - \nu_{PB}$ c/gav y $\nu_{PA} - 16$ c/gav, donde ν_{PB} y ν_{PA} son las frecuencias de corte ($W = 16 - AEM$), donde AEM es la anchura espectral de la muesca. En la Figura A.3.5 se muestra un ejemplo de este tipo de ruido junto con su espectro de densidad de potencia.

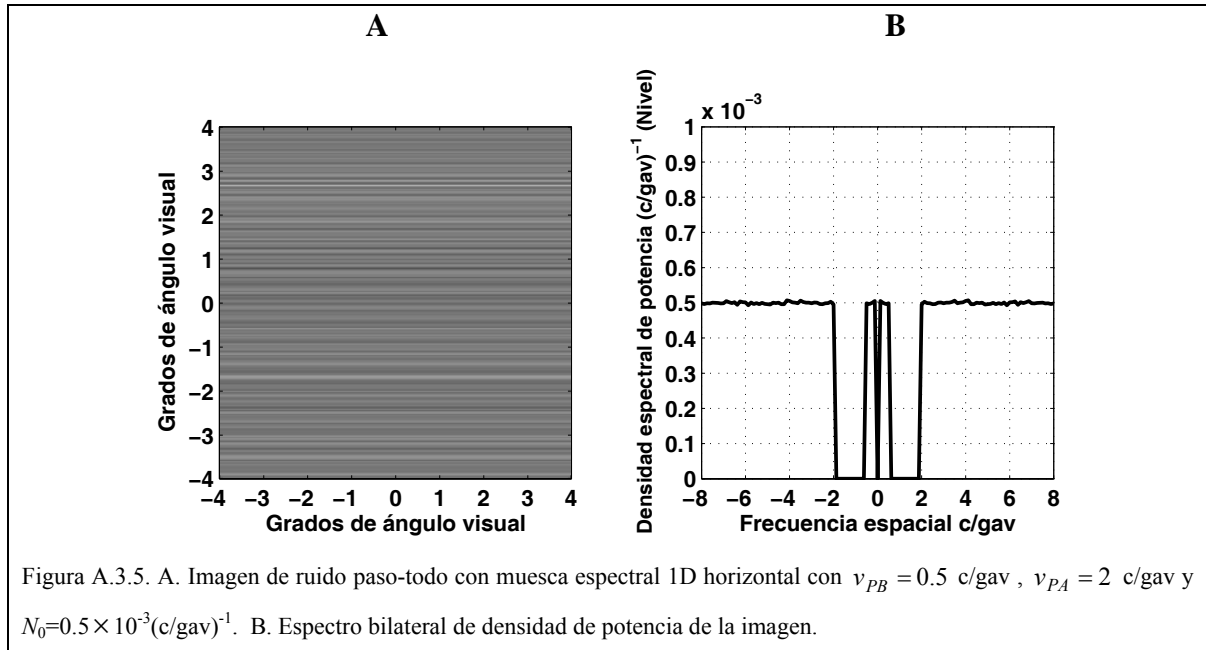


Figura A.3.5. A. Imagen de ruido paso-todo con muesca espectral 1D horizontal con $\nu_{PB} = 0.5$ c/gav , $\nu_{PA} = 2$ c/gav y $N_0 = 0.5 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$. B. Espectro bilateral de densidad de potencia de la imagen.

A.3.1.5. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda ideal

El espectro de potencia del ruido paso-banda horizontal es uniforme dentro del rango de frecuencias $\left[\nu_C - \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ y $\left[\nu_C + \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ c/gav, donde ν_C es la frecuencia central del ruido paso-banda y $\Delta\nu$ es la anchura de banda del ruido paso-banda ($W = \Delta\nu$). En la Figura A.3.6 se muestra un ejemplo de este tipo de ruido junto con su espectro de densidad de potencia.

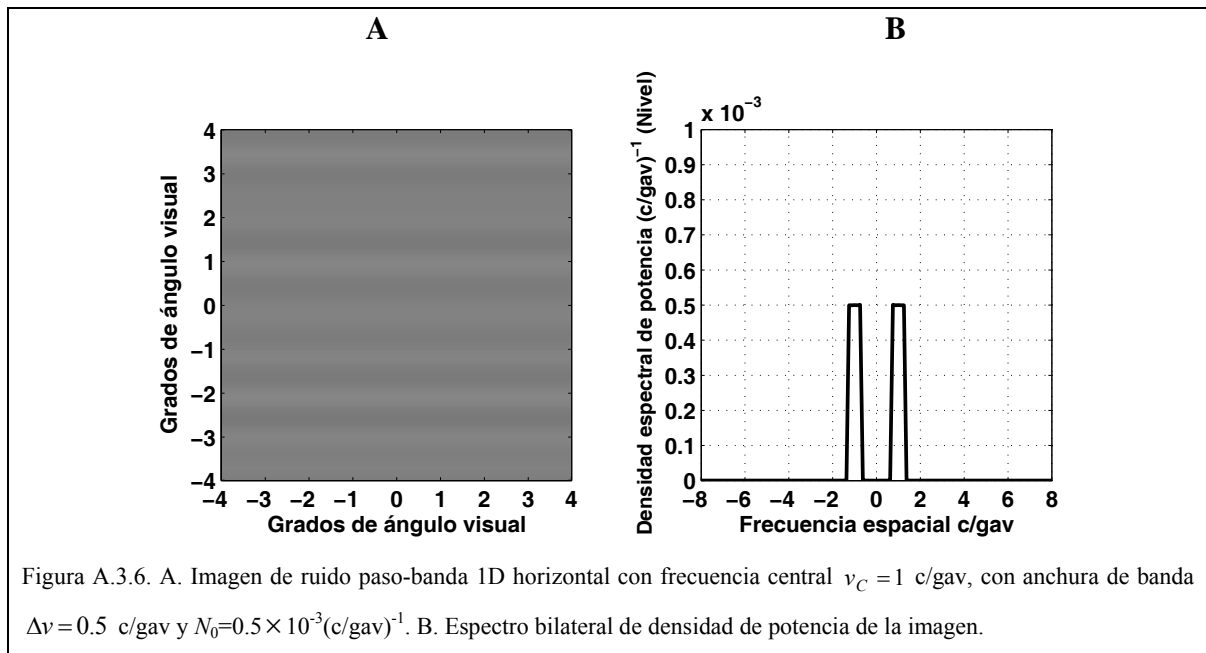
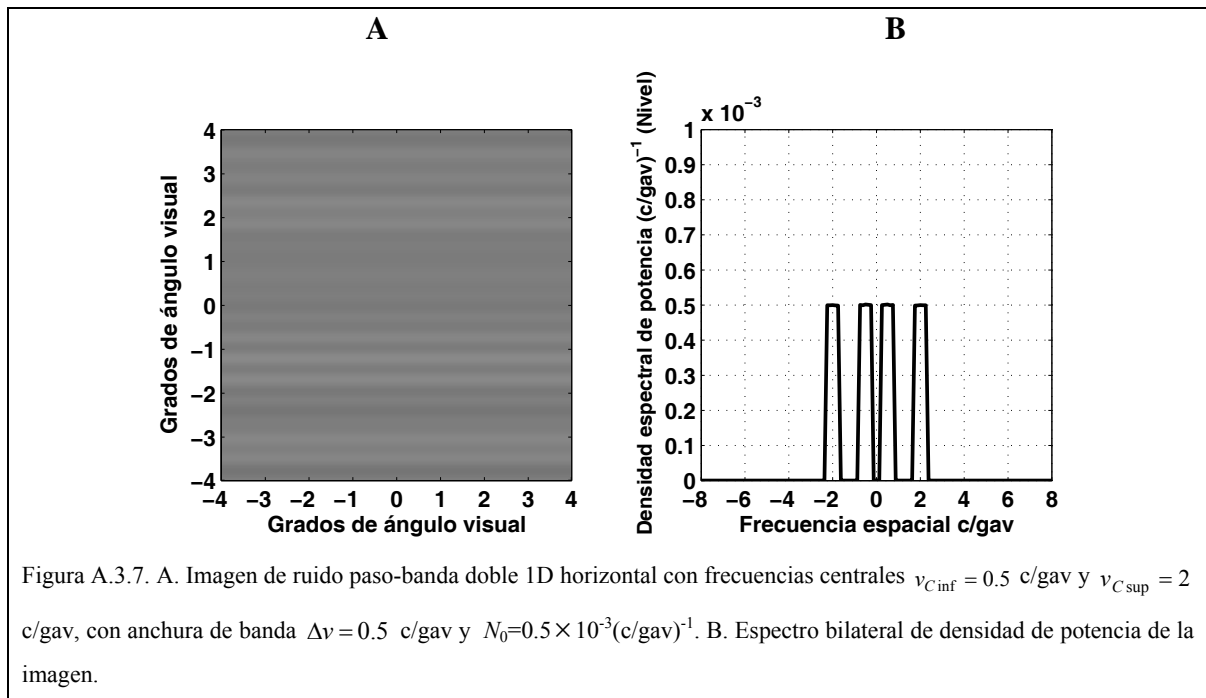


Figura A.3.6. A. Imagen de ruido paso-banda 1D horizontal con frecuencia central $\nu_c = 1$ c/gav, con anchura de banda $\Delta\nu = 0.5$ c/gav y $N_0 = 0.5 \times 10^{-3} (\text{c/gav})^{-1}$. B. Espectro bilateral de densidad de potencia de la imagen.

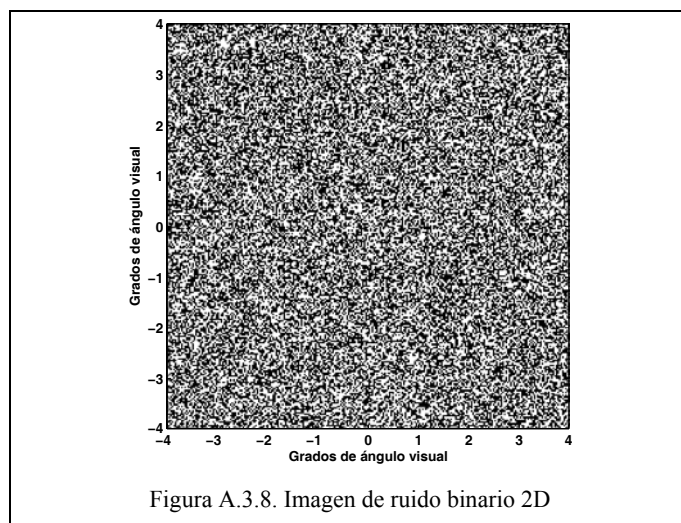
A.3.1.6. Ruido blanco 1D filtrado paso-banda doble ideal

El espectro de potencia del ruido paso-banda doble horizontal es uniforme dentro del rango de frecuencias $\left[\nu_{C_{\text{inf}}} - \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ y $\left[\nu_{C_{\text{inf}}} + \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ c/gav y dentro del rango $\left[\nu_{C_{\text{sup}}} - \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ y $\left[\nu_{C_{\text{sup}}} + \frac{\Delta\nu}{2} \right]$ c/gav, donde $\nu_{C_{\text{inf}}}$ es la frecuencia central del ruido paso-banda inferior, $\nu_{C_{\text{sup}}}$ es la frecuencia central del ruido paso-banda superior, y $\Delta\nu$ es la anchura de banda del ruido, tanto para el ruido paso-banda inferior como para el ruido paso-banda superior ($W = 2 \times \Delta\nu$). En la Figura A.3.7 se muestra un ejemplo de este tipo de ruido junto con su espectro de densidad de potencia.



A.3.2. Generación de ruido binario 2D

Una imagen de ruido binario 2D es una variación aleatoria de luminancia con dos posibles valores equiprobables (1 y 255). Cada elemento del ruido binario utilizado en esta Tesis es un cuadrado formado por 2×2 pixels de la imagen. Es decir, una imagen de 512×512 estará formada por 128×128 elementos de ruido binario. Los números aleatorios para generar los dos valores fueron obtenidos mediante el método de Wichmann y Hill (1982). En la Figura A.3.8 se muestra un ejemplo de ruido binario.



APÉNDICE 4

En este Apéndice se definen los estímulos de primer orden utilizados en el experimento de linealidad y la señal utilizada en los experimentos de enmascaramiento, así como el control del contraste de la señal con independencia del contraste del ruido máscara. También se justifica la eliminación de ventana gaussiana para el cálculo de la potencia del enrejado sinusoidal en el modelo de enmascaramiento.

A.4.1. Enrejados sinusoidales y de onda cuadrada

En el experimento de linealidad se han utilizado dos tipos de estímulos: a) enrejado sinusoidal; y b) enrejado de onda cuadrada. Ambos estímulos fueron ventaneados con una función gaussiana 2D.

a) *Enrejado sinusoidal con ventana gaussiana 2D*

La imagen de un enrejado sinusoidal horizontal ventaneado por una función gaussiana 2D, S es

$$S(x, y) = I_0 \left[1 + \exp \left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2} \right) \cos(2\pi\nu_0 y + \theta) \right], \quad 1 \leq S(x, y) \leq 255,$$

donde I_0 es el nivel de gris ($I_0 = 128$) correspondiente a la luminancia media (L_0) de la pantalla; ν_0 es la frecuencia espacial (en c/gav); Sx y Sy son las anchuras de la ventana gaussiana 2D (en grados de ángulo visual), $Sx = Sy = 2.5$ gav; y θ es la fase (en radianes), $\theta = 0$. Véase en la fila superior de la Figura A.4.1 la imagen (A), su perfil de luminancia (B) y el perfil de su espectro de amplitud (C). Para presentar la imagen en la pantalla véase el Apéndice A.2.2.

Este estímulo se ha utilizado también como señal en los experimentos de enmascaramiento con estímulos de primer orden.

b) *Enrejado de onda cuadrada con ventana gaussiana 2D*

La imagen de un enrejado horizontal de onda cuadrada ventaneado por una función gaussiana 2D, C es

$$C(x, y) = I_0 \left[1 + \exp \left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2} \right) \times q(x, y) \right], \quad 1 \leq C(x, y) \leq 255,$$

donde q se define así

$$q(x, y) = \begin{cases} 1 \Leftrightarrow -\frac{P}{4} \leq y \leq \frac{P}{4} \\ -1 \Leftrightarrow -\frac{P}{2} \leq y < -\frac{P}{4} \quad \text{ó} \quad \frac{P}{4} < y < \frac{P}{2} \end{cases}$$

y

$$q(x, y - nP) = q(x, y), \quad n \in \mathbb{Z},$$

donde $P = \frac{1}{v_0}$, siendo v_0 la frecuencia espacial fundamental, en c/gav, y los parámetros I_0 ,

S_x y S_y tienen el mismo significado y valores que en el estímulo anterior. Véase en la fila inferior de la Figura A.4.1 la imagen (A), su perfil de luminancia (B) y el perfil de su espectro de amplitud (C). Para presentar la imagen en la pantalla véase el Apéndice A.2.2.

El desarrollo en serie de Fourier de la onda cuadrada es

$$q(x, y) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(2\pi n v_0 y + \theta(n)),$$

donde v_0 es la frecuencia espacial fundamental, en c/gav; $\theta(n)$ es la fase, en radianes, ($\theta(n) = 0$ si $n = 1, 5, 9 \dots$ y $\theta(n) = -\pi$ si $n = 3, 7, 11 \dots$). Nótese que la amplitud del primer armónico es $\frac{4}{\pi}$.

A.4.2. Control del contraste de la señal en los experimentos de enmascaramiento con estímulos de primer orden

En los experimentos de enmascaramiento se presenta la señal inserta en ruido. A continuación se muestra el procedimiento utilizado en los experimentos para enmascarar la imagen de una señal con la imagen de un ruido.

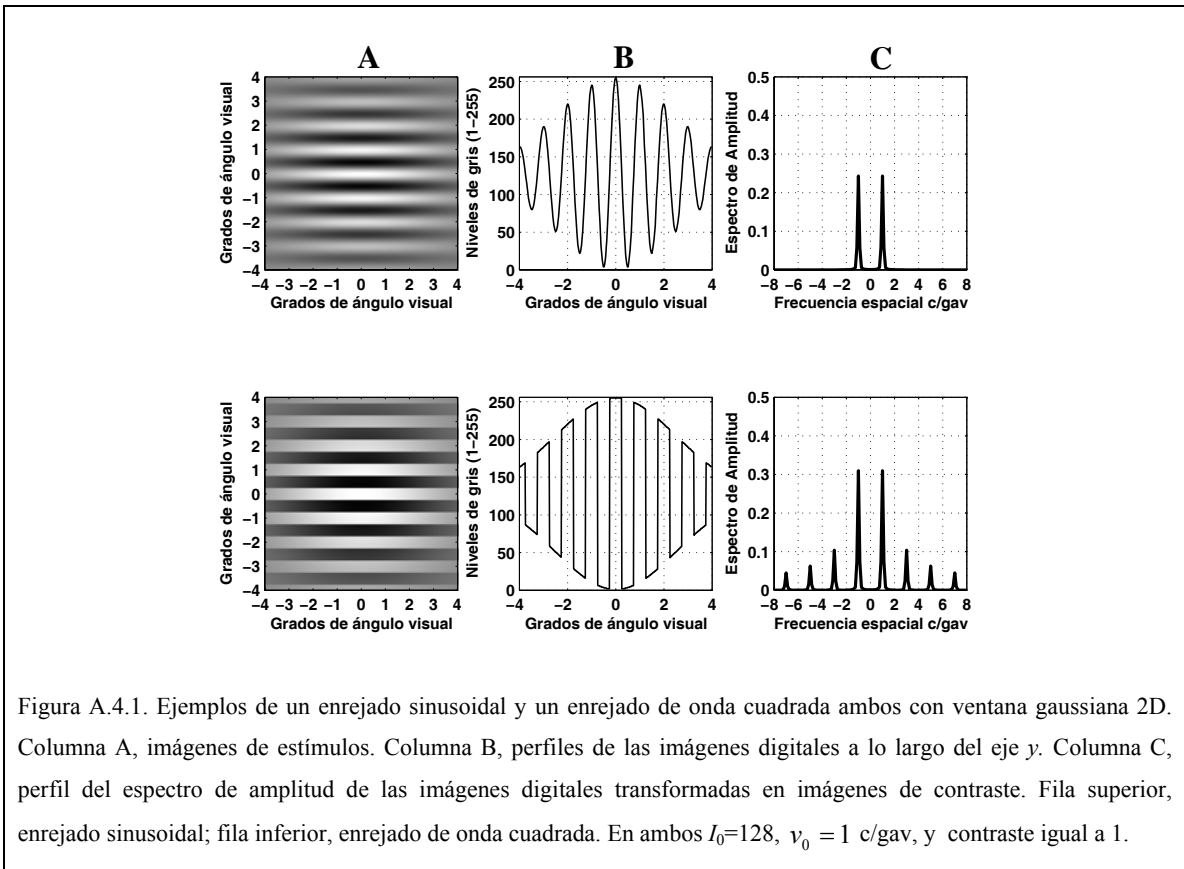


Figura A.4.1. Ejemplos de un enrejado sinusoidal y un enrejado de onda cuadrada ambos con ventana gaussiana 2D. Columna A, imágenes de estímulos. Columna B, perfiles de las imágenes digitales a lo largo del eje y . Columna C, perfil del espectro de amplitud de las imágenes digitales transformadas en imágenes de contraste. Fila superior, enrejado sinusoidal; fila inferior, enrejado de onda cuadrada. En ambos $I_0=128$, $\nu_0 = 1$ c/gav, y contraste igual a 1.

Sean f y r las funciones de contraste correspondientes a un enrejado sinusoidal y a un ruido máscara respectivamente. Para enmascarar la señal con el ruido se generan dos imágenes, una que corresponde a la señal y otra, al ruido,

$$L_{señal} = L_0 [1 + m_f f(x, y)] , \quad m_f \in [0, 1],$$

y

$$L_{ruido} = L_0 [1 + m_r r(x, y)] , \quad m_r \in [0, 1],$$

donde m_f es el contraste del enrejado sinusoidal y m_r depende del tipo de ruido, de la imagen concreta de ruido y de la densidad espectral de potencia o nivel (véase el Apéndice A.3.1).

Para poder manipular el contraste del ruido y el de la señal de modo independiente y no perder niveles de gris de las imágenes digitales, las imágenes correspondientes a la señal y al ruido se presentaron de modo separado mediante la técnica de entrelazado (véase el

apartado 5.5). Un ejemplo del procedimiento de entrelazado se puede ver en la Figura A.4.2. Utilizando esta técnica sucede que

$$L_{señal+ruido} = \frac{L_{señal} + L_{ruido}}{2}.$$

Sustituyendo $L_{señal}$ y L_{ruido} por las expresiones anteriores, se obtiene

$$L_{señal+ruido}(x, y) = L_0 \left[1 + \frac{m_f}{2} f(x, y) + \frac{m_r}{2} r(x, y) \right].$$

Nótese que con este procedimiento, el contraste de la señal m_f y el contraste del ruido m_r se dividen a la mitad. Por lo tanto, si se quiere enmascarar una señal con un ruido r con un contraste m_r , habría que duplicarlo en la imagen L_{ruido} . Esto supone que si para obtener un ruido con un determinado nivel de potencia es necesario un contraste $m_r > 0.5$, la imagen de ruido correspondiente no podría utilizarse. Por ejemplo, como aparece en la Figura A.3.2, para conseguir un nivel $N_0 = 0.5 \times 10^{-3}$ (ciclos/gav)⁻¹ la mayoría de los contrastes de las imágenes de ruido se encuentran entre 0.32 y 0.42, por lo que las imágenes correspondientes podrían utilizarse como máscara. Sin embargo, como se ve en la misma Figura existen otras imágenes de ruido que para obtener ese nivel necesitan un contraste superior a 0.5, y por tanto, no podrían ser utilizadas con la técnica de entrelazado.

Obsérvese que si se presentara en la pantalla solamente la imagen $L_{señal+ruido}$ sin entrelazado, no podría ser utilizado el modo de presentación descrito en el Apéndice A.2.2 y por tanto los contrastes m_f y m_r no podrían ser controlados sin recalcularse las imágenes digitales. Para poder manipular el contraste de cualquier imagen, ésta tiene que tener la forma funcional de la ecuación A.2.1.

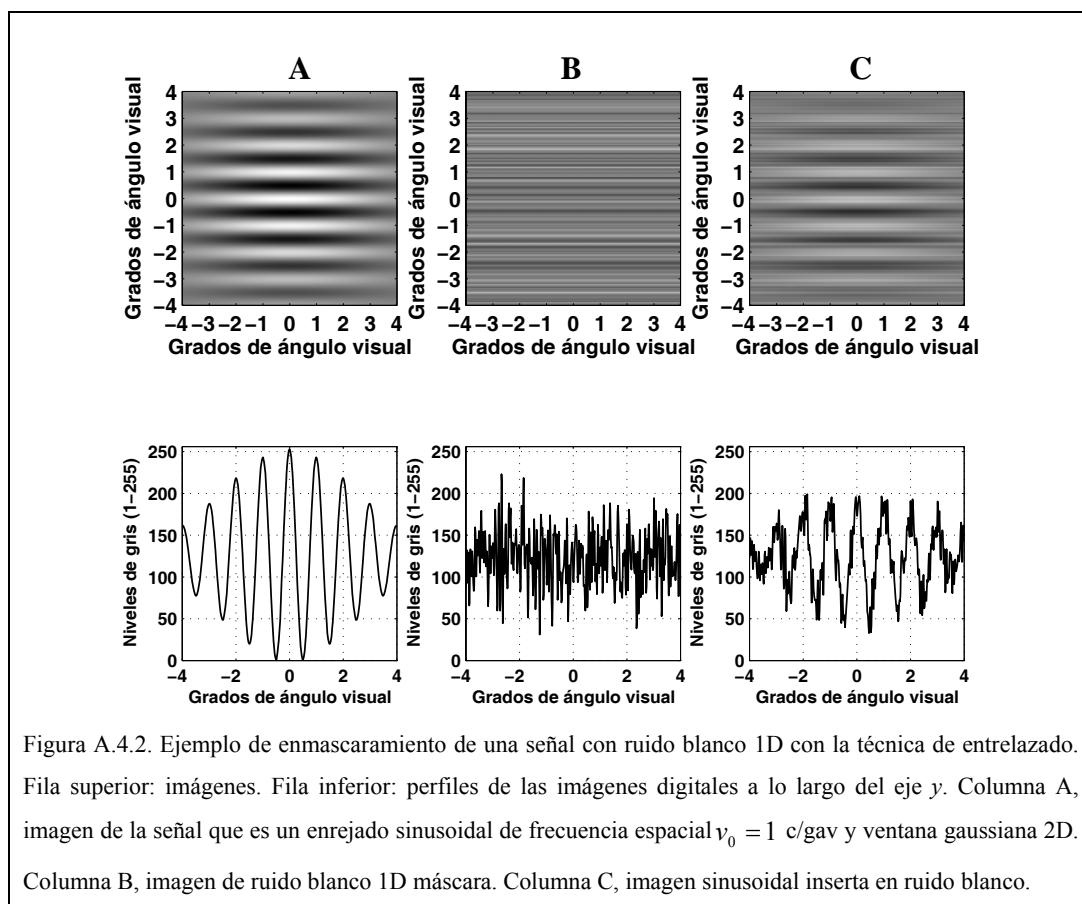


Figura A.4.2. Ejemplo de enmascaramiento de una señal con ruido blanco 1D con la técnica de entrelazado. Fila superior: imágenes. Fila inferior: perfiles de las imágenes digitales a lo largo del eje y. Columna A, imagen de la señal que es un enrejado sinusoidal de frecuencia espacial $\nu_0 = 1$ c/gav y ventana gaussiana 2D. Columna B, imagen de ruido blanco 1D máscara. Columna C, imagen sinusoidal inserta en ruido blanco.

A.4.3. Cálculo de la potencia de una imagen con modulación sinusoidal de la luminancia y ventana gaussiana

Sea l la función de contraste de un enrejado sinusoidal con ventana gaussiana 2D

$$l(x, y) = m \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \cos(2\pi \nu_0 y + \theta).$$

La potencia de contraste de esa función l , que subtiende $gx \times gy$ grados de ángulo visual, se define del siguiente modo (el caso discreto se ha definido en el apartado A.1.2)

$$P_C = \frac{1}{gx \times gy} \int_{-gx/2}^{gx/2} \int_{-gy/2}^{gy/2} l^2(x, y) dx dy.$$

Sustituyendo la función de contraste en la integral se obtiene

$$P_C = \frac{1}{gx \times gy} \int_{-gx/2}^{gx/2} \int_{-gy/2}^{gy/2} \left[m \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \cos(2\pi \nu_0 y + \theta) \right]^2 dx dy.$$

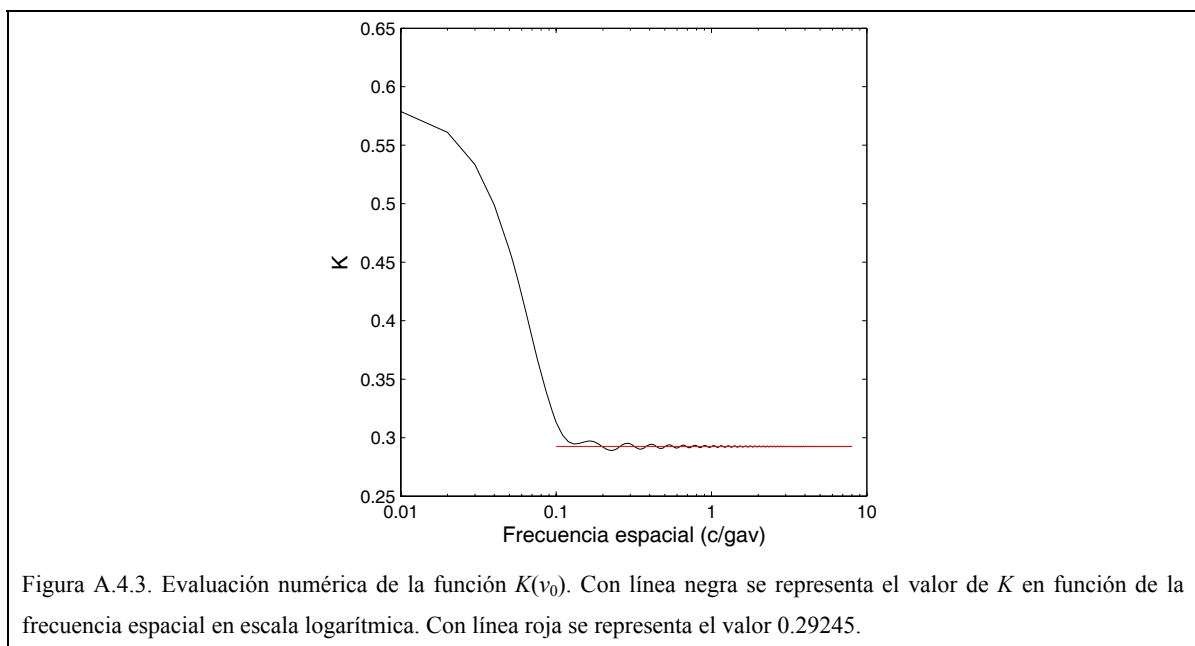
Sacando m de la integral y, multiplicando y dividiendo por 2, se tiene

$$P_C = \frac{m^2}{2} \times \left\{ \underbrace{\frac{2}{g_x \times g_y} \int_{-g_x/2}^{g_x/2} \int_{-g_y/2}^{g_y/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2S_x^2} - \frac{y^2}{2S_y^2}\right) \cos(2\pi \nu_0 y + \theta)}_{K(\nu_0)} dx dy \right\}.$$

Potencia del enrejado

$K(\nu_0)$

En todos los experimentos las imágenes subtienden 8×8 gav ($g_x \times g_y$) y la ventana gaussiana siempre tiene las mismas dimensiones $S_x = S_y = 2.5$ gav. En la Figura A.4.3 aparecen los resultados de la evaluación numérica de la expresión K para ν_0 desde 0.01 c/gav hasta 8 c/gav en incrementos de 0.01 c/gav. Nótese que, para frecuencias espaciales superiores a 0.2 c/gav, K es aproximadamente constante y su valor próximo a 0.29245 (línea roja). Se concluye, que en nuestro caso, la potencia de los enrejados sinusoidales con ventana gaussiana fija es independiente de la frecuencia espacial de éstos. Por ello, por simplicidad, en el modelo de enmascaramiento (véase el Capítulo 4) se tomará la potencia del enrejado en ausencia de la ventana gaussiana.



APÉNDICE 5

En este Apéndice se definen los estímulos de segundo orden utilizados en el experimento de linealidad y la señal utilizada en los experimentos de enmascaramiento. También se muestra el procedimiento de control de la profundidad de modulación de una imagen de contraste modulado, el procedimiento para enmascarar una señal moduladora con ruido modulador, y el control de la profundidad de modulación de una señal moduladora enmascarada con ruido modulador.

A.5.1. Estímulos de contraste modulado sinusoidalmente y con función de onda cuadrada

En los experimentos de linealidad con estímulos de segundo orden (estímulos CM) se han utilizado dos tipos de modulaciones del contraste, a) modulación sinusoidal, y b) modulación de onda cuadrada. La función portadora para los estímulos CM fue siempre ruido binario 2D (véase la Figura A.3.8).

a) Imagen de *ruido binario 2D con modulación sinusoidal del contraste*.

Sea f la función moduladora sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \cos(2\pi\nu_0 y + \theta),$$

(véase en la Figura A.5.1 (A) esta modulación en forma de imagen). Sea p la función portadora, que es ruido 2D binario con valores (-1,1) (véase la Figura A.5.1 (B) esta portadora en forma de imagen). La imagen de contraste modulado sinusoidalmente es (véase la Figura A.5.1 C)

$$CM_{\text{sinu}}(x, y) = L_0 \left[1 + k(1 + m_f f(x, y))p(x, y) \right], \quad m_f \in [0, 1] \text{ y } k \in [0, 0.5],$$

donde m_f es la profundidad de modulación o contraste de la función moduladora f y k es el contraste de la función portadora p .

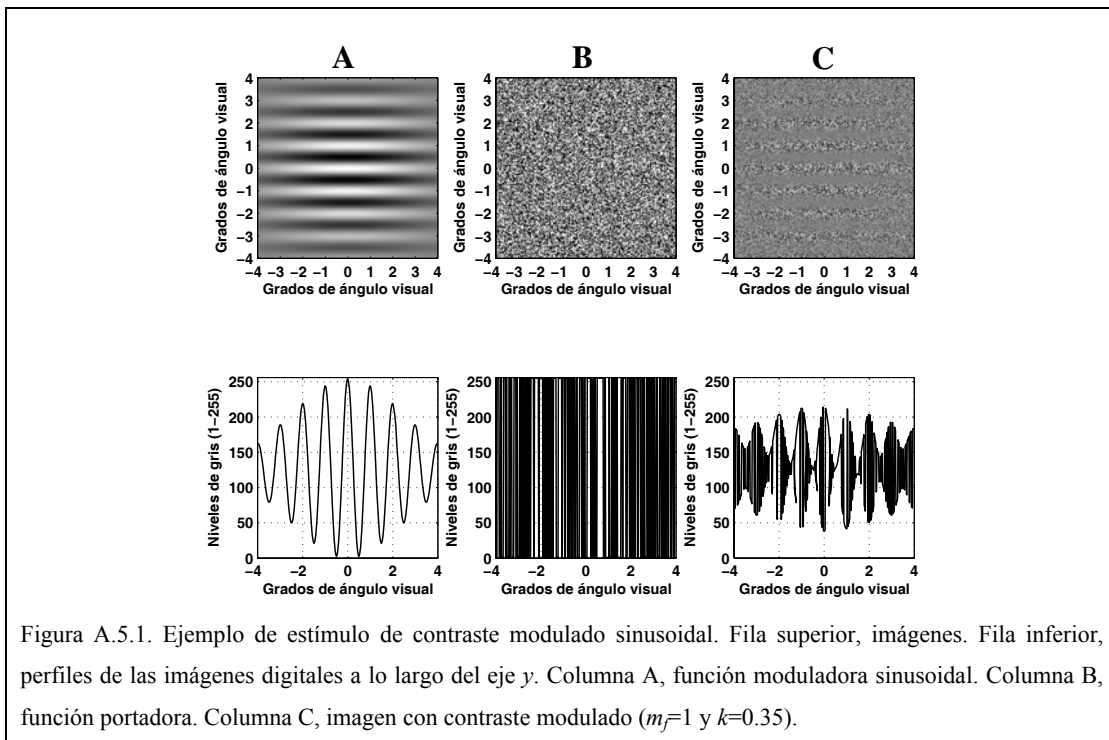


Figura A.5.1. Ejemplo de estímulo de contraste modulado sinusoidal. Fila superior, imágenes. Fila inferior, perfiles de las imágenes digitales a lo largo del eje y . Columna A, función moduladora sinusoidal. Columna B, función portadora. Columna C, imagen con contraste modulado ($m_f=1$ y $k=0.35$).

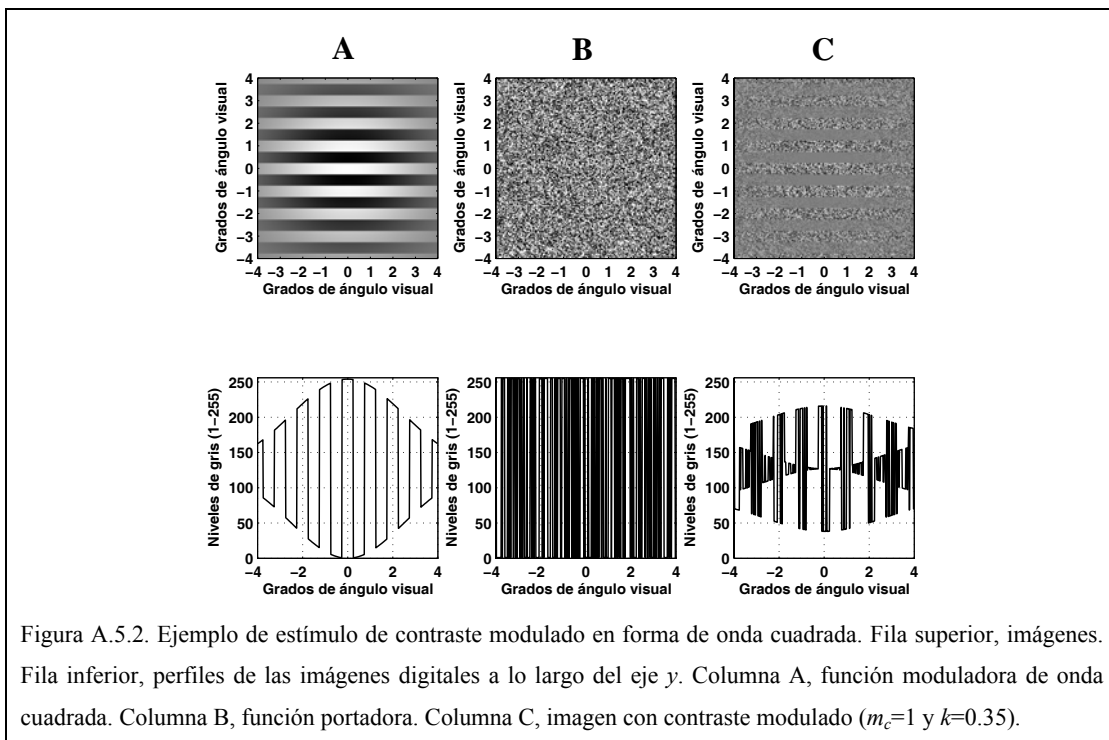


Figura A.5.2. Ejemplo de estímulo de contraste modulado en forma de onda cuadrada. Fila superior, imágenes. Fila inferior, perfiles de las imágenes digitales a lo largo del eje y . Columna A, función moduladora de onda cuadrada. Columna B, función portadora. Columna C, imagen con contraste modulado ($m_c=1$ y $k=0.35$).

b) Imagen de *ruido binario 2D con modulación de onda cuadrada del contraste*.

Sea c la función moduladora de onda cuadrada horizontal con ventana gaussiana

$$c(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{2Sx^2} - \frac{y^2}{2Sy^2}\right) \times q(x, y),$$

donde q es la función de onda cuadrada (véase el Apéndice A.4.1 y una imagen de esta modulación en la Figura A.5.2 A). Sea p la función portadora, que es ruido binario 2D con valores (-1,1), la imagen de contraste modulado en forma de onda cuadrada es (véase la Figura A.5.2 C)

$$CM_{\text{cuad}}(x, y) = L_0 [1 + k(1 + m_c c(x, y))p(x, y)], \quad m_c \in [0, 1] \text{ y } k \in [0, 0.5],$$

donde m_c es la profundidad de modulación o contraste de la función moduladora c y k es el contraste de la función portadora p .

A.5.2. Control de la profundidad de modulación de una imagen de contraste modulado

Para poder manipular de modo independiente la profundidad de modulación m_f y el contraste k de la función portadora de una imagen CM, se ha utilizado la técnica de entrelazado (Schofield y Georgeson, 1999). A continuación se describe la técnica para este caso particular. Sea la imagen de contraste modulado

$$CM_{\text{sinu}}(x, y) = L_0 [1 + k(1 + m_f f(x, y))p(x, y)].$$

Esta imagen se puede descomponer en las dos imágenes siguientes:

$$CM_1(x, y) = L_0 [1 + 2km_f f(x, y)p(x, y)],$$

y

$$CM_2(x, y) = L_0 [1 + 2kp(x, y)],$$

de tal modo que al presentar estas imágenes mediante la técnica de entrelazado se obtiene la imagen original

$$CM_{\text{sinu}} = \frac{CM_1 + CM_2}{2} = L_0 [1 + k(1 + m_f f(x, y))p(x, y)].$$

Un ejemplo de esta técnica se puede ver en la Figura A.5.3.

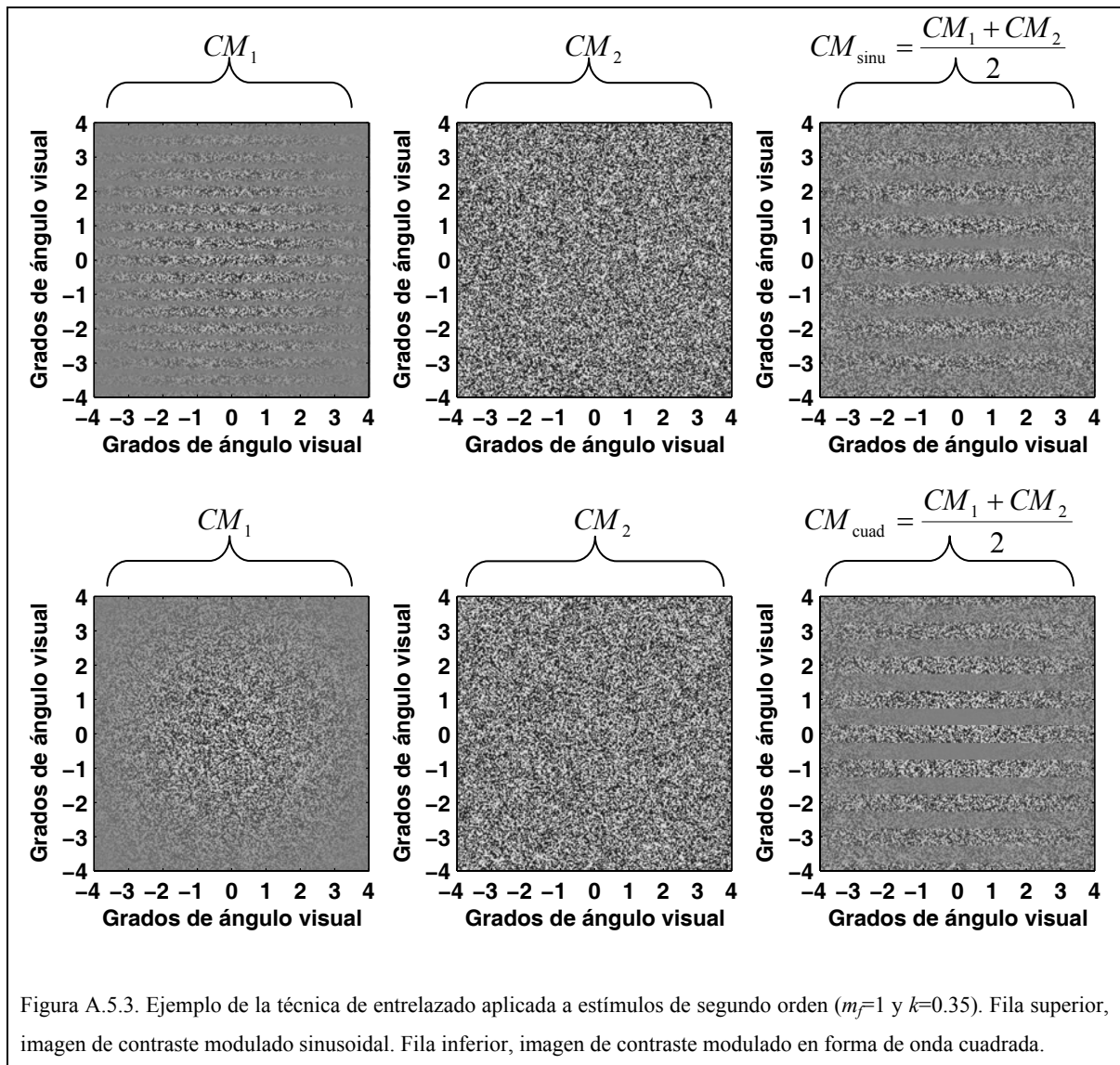


Figura A.5.3. Ejemplo de la técnica de entrelazado aplicada a estímulos de segundo orden ($m_f=1$ y $k=0.35$). Fila superior, imagen de contraste modulado sinusoidal. Fila inferior, imagen de contraste modulado en forma de onda cuadrada.

Nótese que en el caso de la modulación de onda cuadrada, ninguna de las imágenes presentadas por separado lleva perceptivamente información acerca de la modulación. Nótese también que la profundidad de modulación afecta solamente a la imagen CM_1 .

A.5.3. Procedimiento para enmascarar una señal moduladora con ruido modulador

En los experimentos de enmascaramiento con estímulos de segundo orden, la señal es una modulación sinusoidal del contraste y el ruido máscara, una modulación ruidosa del

contraste (ruido paso-banda 1D). La función portadora para ambas modulaciones fue el mismo ruido binario 2D.

Sea f una función moduladora sinusoidal horizontal con ventana gaussiana 2D, y sea r un ruido (paso-banda horizontal 1D) modulador del contraste. Las imágenes de contraste modulado por la señal y por el ruido son:

$$CM_{señal}(x, y) = L_0 \left[1 + k(1 + m_f f(x, y))p(x, y) \right] \text{ (señal),}$$

y

$$CM_{ruido}(x, y) = L_0 \left[1 + k(1 + m_r r(x, y))p(x, y) \right] \text{ (máscara),}$$

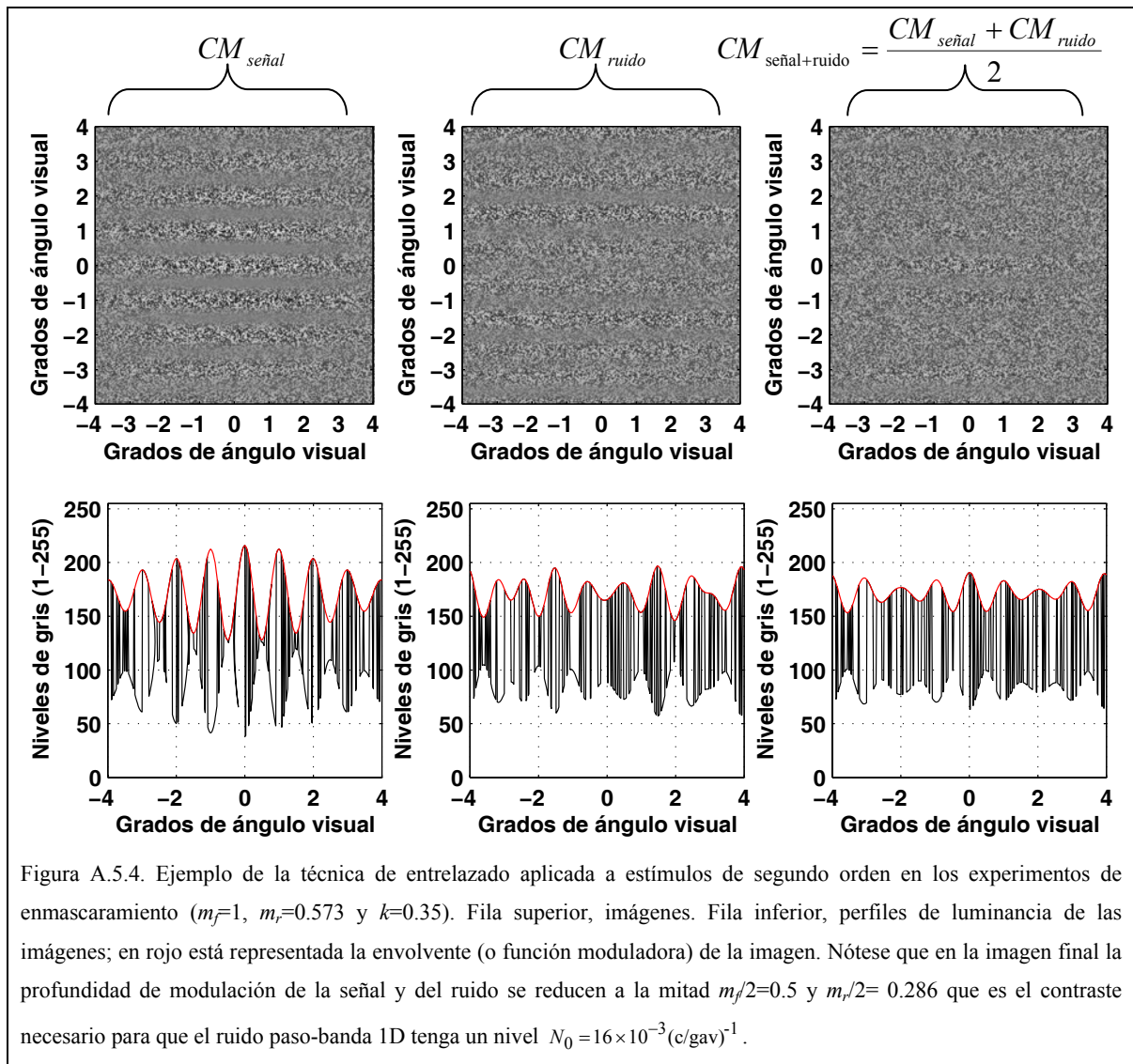
para $m_f \in [0, 1]$, $m_c \in [0, 1]$, y $k \in [0, 0.5]$. En las ecuaciones m_f es la profundidad de modulación de la señal o contraste de la función moduladora f ; m_r es la profundidad de modulación del ruido o contraste de la función moduladora r ; y k es el contraste de la función portadora p común a ambas imágenes.

Si se utiliza la técnica de entrelazado para enmascarar la señal ($CM_{señal}$) con el ruido máscara (CM_{ruido}), se obtiene

$$CM_{señal+ruido} = \frac{CM_{señal} + CM_{ruido}}{2} = L_0 \left[1 + k \left(1 + \frac{m_f}{2} f(x, y) + \frac{m_r}{2} r(x, y) \right) p(x, y) \right].$$

El resultado final es una función moduladora que está compuesta de una función sinusoidal (señal) inserta en un ruido paso-banda 1D (máscara). Nótese que, como en el caso de enmascaramiento con estímulos de primer orden, la profundidad de modulación o el contraste de las funciones moduladoras m_f y m_r se reduce a la mitad. Un ejemplo de esta técnica se muestra en la Figura A.5.4.

El problema que surge cuando se presentan las imágenes $CM_{señal}$ y CM_{ruido} como se ha descrito y aparece en la Figura A.5.4, es la imposibilidad de manipular de modo independiente el contraste de la señal m_f y el contraste del ruido m_r , ya que no tienen la forma funcional de la ecuación (A.2.1). Para poder manipular la profundidad de modulación m_f y m_r es necesario aplicar un procedimiento diferente. A continuación se muestra este procedimiento.



A.5.4. Control de la profundidad de modulación de una señal moduladora enmascarada con ruido modulador

En los experimentos de enmascaramiento con estímulos de segundo orden se plantea el problema de controlar de modo independiente la profundidad de modulación de la señal m_f y la profundidad de modulación del ruido m_r . Para ello, utilizando la técnica de entrelazado se han modificando las imágenes que se mezclan. En efecto, si la imagen de contraste modulado resultado de enmascarar la señal moduladora con ruido modulador es

$$CM_{\text{señal+ruido}}(x, y) = L_0 \left[1 + k \left(1 + \frac{m_f}{2} f(x, y) + \frac{m_r}{2} r(x, y) \right) p(x, y) \right],$$

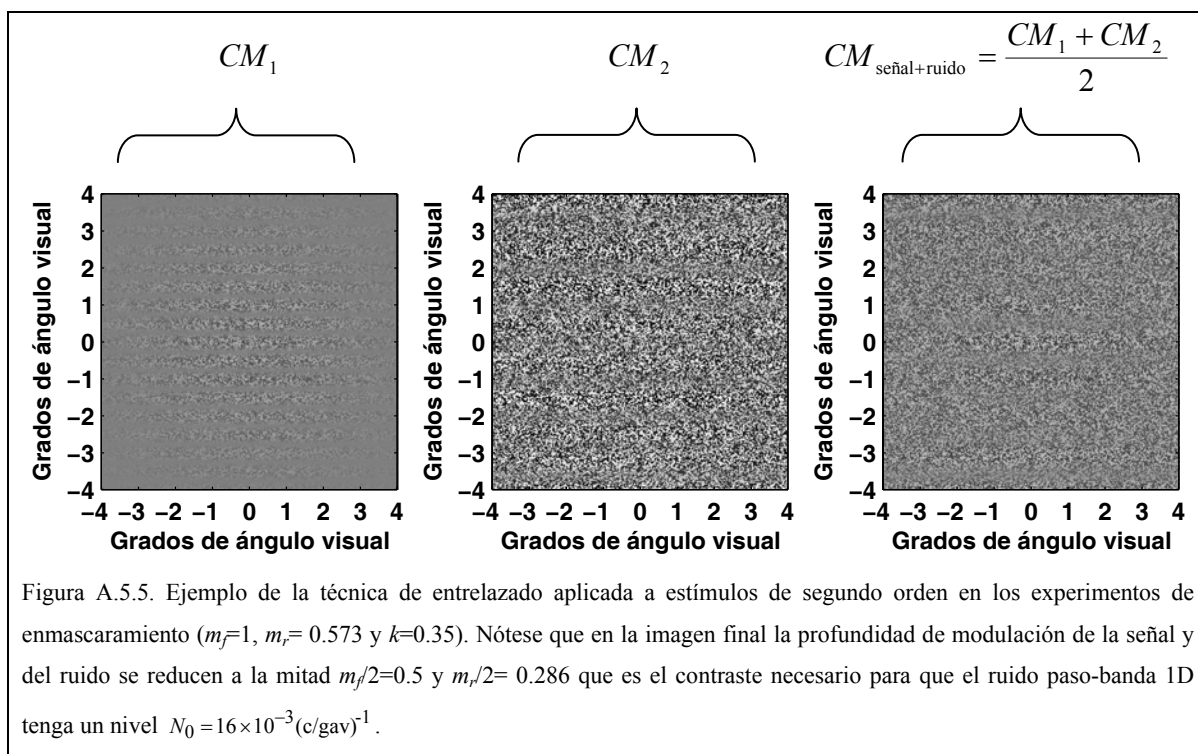
es fácil mostrar que esta imagen se puede descomponer en las dos imágenes siguientes

$$CM_1(x, y) = L_0 \left[1 + 2k \frac{m_f}{2} f(x, y) p(x, y) \right],$$

y

$$CM_2(x, y) = L_0 \left[1 + 2k \left(1 + \frac{m_r}{2} r(x, y) \right) p(x, y) \right].$$

De tal modo que al presentar estas imágenes mediante la técnica de entrelazado se obtiene la imagen $CM_{\text{señal+ruido}}$. Nótese que en este caso CM_1 tiene la forma funcional de la ecuación (A.2.1) y, por lo tanto, puede cambiarse el valor de m_f sin recalcular la imagen digital. Un ejemplo de este procedimiento con los nuevos estímulos se puede ver en la Figura A.5.5.



Procedimiento efectivo para enmascarar una señal de contraste modulado.

En la práctica, para enmascarar estímulos de segundo orden en los que la señal es una modulación sinusoidal del contraste, y el ruido máscara, una modulación ruidosa del contraste, se ha procedido de modo siguiente:

1) Se han generado dos imágenes digitales con 255 niveles de gris cada una

$$CM_{digital1}(x, y) = I_0 \left[1 + f(x, y) p(x, y) \right], \quad 1 \leq CM_{digital1} \leq 255,$$

y

$$CM_{digital2}(x, y) = I_0 \left[1 + 2k \left(1 + \frac{m_r}{2} r(x, y) \right) p(x, y) \right], \quad 1 \leq CM_{digital2} \leq 255,$$

donde I_0 , es el nivel de gris ($I_0=128$) correspondiente a la luminancia media (L_0) de la pantalla. En todos los experimentos $k = 0.35$, $m_f \in [0,1]$ y $m_r \in [0,0.85]$. Es fácil demostrar que para $k = 0.35$ el contraste del ruido m_r tiene que ser menor o igual a 0.85 si se desea que los niveles de gris de la imagen $CM_{digital2}$ se encuentren dentro del rango $1 \leq CM_{digital2} \leq 255$. El contraste m_r en cada imagen $CM_{digital2}$ es el preciso para que la muestra de ruido tenga el nivel de ruido deseado.

2) Se convierten esas dos imágenes digitales para presentarlas en la pantalla (véase la Figura A.5.5)

$$CM_1(x, y) = L_0 \left[1 + 2k \frac{m_f}{2} \left(\frac{CM_{digital1}(x, y)}{I_0} - 1 \right) \right],$$

y

$$CM_2(x, y) = L_0 \left[1 + \left(\frac{CM_{digital2}(x, y)}{I_0} - 1 \right) \right].$$

3) Finalmente mediante la técnica de entrelazado se obtiene el resultado deseado

$$CM_{señal+ruido} = \frac{CM_1 + CM_2}{2} = L_0 \left[1 + k \left(1 + \frac{m_f}{2} f(x, y) + \frac{m_r}{2} r(x, y) \right) p(x, y) \right].$$

APÉNDICE 6

En este Apéndice se muestra el procedimiento experimental utilizado para obtener los umbrales sensoriales. También se han simulado las condiciones experimentales para comprobar que el procedimiento utilizado es apropiado.

A.6.1. Procedimiento bayesiano para obtener umbrales sensoriales

Para poder aplicar el procedimiento bayesiano de escaleras adaptativas, es necesario especificar la función de densidad de probabilidad inicial, la función modelo, la función de respuesta, la función de densidad de probabilidad posterior y cómo se obtiene el umbral final. A continuación se detallan las características del procedimiento utilizado en todos los experimentos:

1) *Función de densidad de probabilidad inicial o a priori*

Expresa la función de densidad de probabilidad del umbral. En nuestro caso la función utilizada es la distribución constante o uniforme $u(x)$ (Emerson, 1986).

$$u(x) = 1, \text{ para } x \in [-4, 2], \text{ en pasos de } 0.01,$$

donde x son los contrastes de Michelson en unidades logarítmicas. Nótese que si $x = \log_{10}(m)$ y $m \in [0, 1]$ entonces el valor máximo de x supera el valor máximo posible de contrastes. Teniendo en cuenta que la mayoría de los umbrales que obtendremos se encuentran entre -2 y 0 unidades logarítmicas aproximadamente, con la elección de este rango conseguimos que la distribución en unidades logarítmicas sea simétrica en torno a este rango y de este modo evitar artefactos en la estimación de umbrales cuando éstos están próximos al valor máximo de contraste.

2) *Función modelo $M(x; U)$*

Esta función representa un supuesto acerca de la función psicométrica del sujeto en la tarea. La función modelo utilizada aquí es la función logística (Pentland, 1980; Emerson, 1986; Madigan y Williams, 1987; para una descripción detallada de esta función véase García-Pérez, 1998, Apéndice A). La función logística utilizada se define así

$$M(x; U) = \gamma + \frac{1 - \lambda - \gamma}{1 + \exp[\beta(\alpha + x - U)]}, \quad x \in [-4, 2], \text{ en pasos de } 0.01.$$

El parámetro U es la intensidad (contraste logarítmico) con la que se presenta el estímulo.

Los parámetros λ y γ corresponden a la probabilidad de cometer un error y a la probabilidad de acertar al azar (que en el caso 2AFC es 0.5), respectivamente.

Los parámetros α y β corresponden a los parámetros posición y la pendiente de la función psicométrica (Treutwein, 1995), y se definen así

$$\beta = \frac{2}{\sigma} \ln \left[\frac{1 - \lambda - \gamma - \delta}{\delta} \right],$$

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{1 - \lambda - \pi}{\pi - \gamma} \right] \text{ (García-Pérez, 1998, Apéndice A).}$$

El parámetro π es la probabilidad de acertar con respecto al cual está definido el umbral. En todos los experimentos en la determinación de los umbrales, los parámetros y valores utilizados son $\lambda = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $\pi = 0.75$ y $\delta = 0.01$.

El parámetro σ corresponde a la anchura de la función psicométrica. Es decir si $M(x_A) = \gamma + \delta$ y $M(x_B) = 1 - \lambda - \delta$ entonces $\sigma = x_A - x_B$ (García-Pérez, 1998). En caso de desconocer la anchura real de la función psicométrica del sujeto, cuando se utilizan las escaleras bayesianas es recomendable que la anchura de la función modelo no sea inferior a la anchura de la función psicométrica que caracteriza al sujeto (Alcalá-Quintana y García-Pérez, 2004). Cuando la tarea es detectar enrejados sinusoidales, Watson y Pelli (1983) establecen que el parámetro β (pendiente) de la función Weibull sería $\beta = 3.5$; ese valor corresponde a una anchura de $\sigma = 0.65$. Siguiendo las recomendaciones anteriores, la anchura que se ha utilizado es $\sigma = 0.8$.

3) Función de verosimilitud de la respuesta $V(r, x, U)$

$$V(r, x, U) = \begin{cases} 1 - M(x; U) & \text{si } r = 0 \\ M(x; U) & \text{si } r = 1 \end{cases},$$

donde r es la respuesta del sujeto ($r = 1$ acierto y $r = 0$ error)

4) Función de densidad de probabilidad posterior $P_i(x)$

La función de probabilidad posterior se obtiene multiplicando la función de densidad de probabilidad inicial o a priori por la función de verosimilitud de la respuesta.

a) Para el primer ensayo, se tiene

$$P_1(x) = u(x)V(r_1, x, U_0),$$

donde r_1 es la respuesta del sujeto en primer ensayo y U_0 es la media de $u(x)$ ($U_0 = -1$).

Por lo tanto el contraste de Michelson en el primer ensayo es $m_1=0.1$.

b) Para el resto de ensayos, la función de densidad de probabilidad posterior del ensayo i , se convierte en una función de densidad de probabilidad inicial o a priori del ensayo $i+1$.

$$P_{i+1}(x) = P_i(x)V(r_{i+1}, x, U_i), \quad i \in [1, n],$$

donde n es el número de ensayos.

4) Selección de la intensidad en cada ensayo

La selección de la intensidad (contraste) U_i en cada ensayo se obtiene calculando la media de la función de densidad de probabilidad a priori (Emerson, 1986; King-Smith et al., 1994). En general

$$U_i = \frac{\int xP_{i-1}(x)dx}{\int P_{i-1}(x)dx},$$

en nuestro caso

$$U_i = \frac{\sum xP_{i-1}(x)\Delta x}{\sum P_{i-1}(x)\Delta x}, \quad x \in [-4, 2], \quad \Delta x = 0.01 \text{ unidades logarítmicas.}$$

Si el valor de U_i alcanza un valor imposible ($U_i > 0$) entonces este valor se sigue utilizando en el cálculo aunque físicamente se presente el contraste máximo permitido. Este tratamiento elimina artefactos en la estimación de umbrales próximos al valor límite (García-Pérez, 1998).

El uso de la media produce menor sesgo y menor error típico (Emerson, 1986; King-Smith et al., 1994) que el uso de la moda (Watson y Pelli, 1983) o de la mediana con el mismo número de ensayos.

5) Criterio para terminar la escalera

El criterio para terminar la escalera bayesiana fue el número de ensayos (Emerson, 1986; Kontsevich y Tyler, 1998; Madigan y Williams, 1987) ya que el criterio dinámico es poco recomendable (Anderson, 2003) En particular, en todas las determinaciones de los umbrales, el número de ensayos fue siempre 70.

5) El umbral final se obtiene a partir de la media de la *función de densidad de probabilidad final* $P_n(x)$. En general

$$\hat{U}_n = \frac{\int x P_n(x) dx}{\int P_n(x) dx}, \text{ donde } n \text{ es el número de ensayos.}$$

en nuestro caso

$$\hat{U}_n = \frac{\sum x P_n(x) \Delta x}{\sum P_n(x) \Delta x}, \quad x \in [-4, 2], \quad \Delta x = 0.01 \text{ unidades logarítmicas.}$$

A.6.2. Propiedades estadísticas del procedimiento bayesiano utilizado

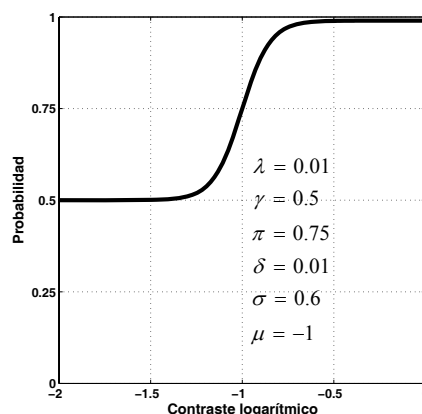
Para comprobar las propiedades estadísticas del procedimiento bayesiano utilizado en los experimentos, se han simulado un conjunto de condiciones experimentales para la determinación de los umbrales sensoriales. Los parámetros y valores de la *función modelo* (logística) utilizados en los experimentos y en la simulación son $\lambda = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $\pi = 0.75$, $\delta = 0.01$, $\sigma = 0.8$ y el criterio para terminar la escalera bayesiana fue el número de ensayos, en particular 70 ensayos. Se han supuesto dos tipos de funciones psicométricas que caracterizan al sujeto en tareas de detección: A) la función logística (Pentland, 1980; Emerson, 1986; Madigan y Williams, 1987; García-Pérez, 1998) y, B) la función de Weibull (Nachmias, 1981; Treutwein, 1995; García-Pérez, 1998; Wichmann y Hill, 2001). A continuación se describen formalmente estas dos funciones psicométricas.

A) *Función logística*

$$\Psi(m) = \gamma + \frac{1 - \lambda - \gamma}{1 + \exp[\beta(\alpha - \log(m) + \mu)]}, \quad m \in [0, 1],$$

$$\beta = \frac{2}{\sigma} \ln \left[\frac{1 - \lambda - \gamma - \delta}{\delta} \right],$$

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{1 - \lambda - \pi}{\pi - \gamma} \right].$$



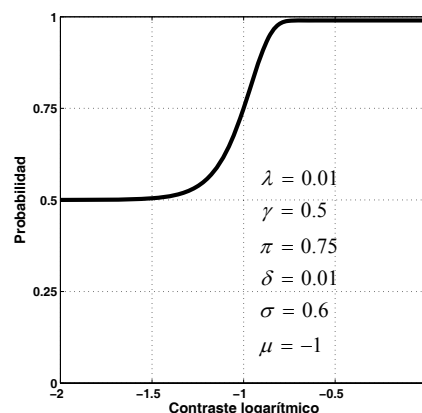
Función psicométrica logística utilizada en las simulaciones.

B) *Función de Weibull*

$$\Psi(m) = 1 - \lambda - (1 - \lambda - \gamma) \exp\left[-\left(\frac{m}{\alpha}\right)^\beta\right], \quad m \in [0, 1],$$

$$\beta = \frac{1}{\sigma} \log\left(\frac{\ln[\delta/(1 - \lambda - \gamma)]}{\ln[(1 - \lambda - \gamma - \delta)/(1 - \lambda - \gamma)]}\right),$$

$$\alpha = 10^\mu (\ln[(1 - \lambda - \gamma)/(1 - \lambda - \pi)])^{-1/\beta}.$$



Función psicométrica Weibull utilizada en las simulaciones. Nótese que el contraste m se ha representado en unidades logarítmicas.

En todas las simulaciones los parámetros de las dos funciones psicométricas fueron $\lambda = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $\pi = 0.75$, $\delta = 0.01$. En total se simularon $2 \times 3 \times 5 = 30$ condiciones experimentales, resultado de la combinación factorial de dos funciones psicométricas que caracterizan al sujeto (logística y Weibull), tres umbrales teóricos $\mu \in \{-0.5 - 1 - 2\}$, y cinco tipos diferentes de anchura de las funciones psicométricas $\sigma \in \{0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2\}$.

En cada condición se obtuvieron 2000 medias de tres experimentos de 70 ensayos cada uno, es decir, en cada condición se simularon 6000 experimentos. Para la generación de números aleatorios en las simulaciones se utilizó el procedimiento de Wichmann y Hill (1982).

Los resultados en la determinación del umbral teórico supuesta la función logística se pueden ver en la Figura A.6.1, los resultados con la función Weibull pueden ver en la Figura A.6.2. Como se observa en estas Figuras el procedimiento bayesiano utilizado es bastante eficiente para esas dos funciones psicométricas, para σ diferentes a la de la función modelo y para diferentes umbrales teóricos. La Figura A.6.3 muestra los histogramas correspondientes a las simulaciones con el modelo Logístico con $\mu = -1$ y con $\sigma \in \{0.6, 0.8, 1, 1.2\}$.

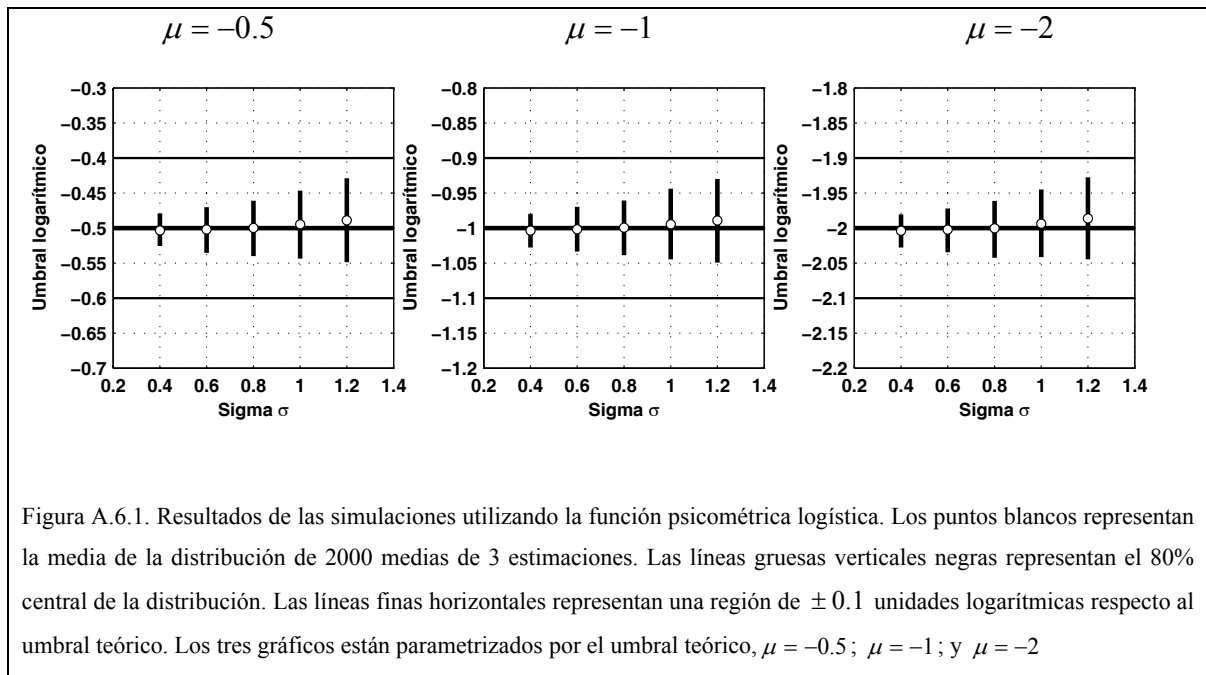


Figura A.6.1. Resultados de las simulaciones utilizando la función psicométrica logística. Los puntos blancos representan la media de la distribución de 2000 medias de 3 estimaciones. Las líneas gruesas verticales negras representan el 80% central de la distribución. Las líneas finas horizontales representan una región de ± 0.1 unidades logarítmicas respecto al umbral teórico. Los tres gráficos están parametrizados por el umbral teórico, $\mu = -0.5$; $\mu = -1$; y $\mu = -2$

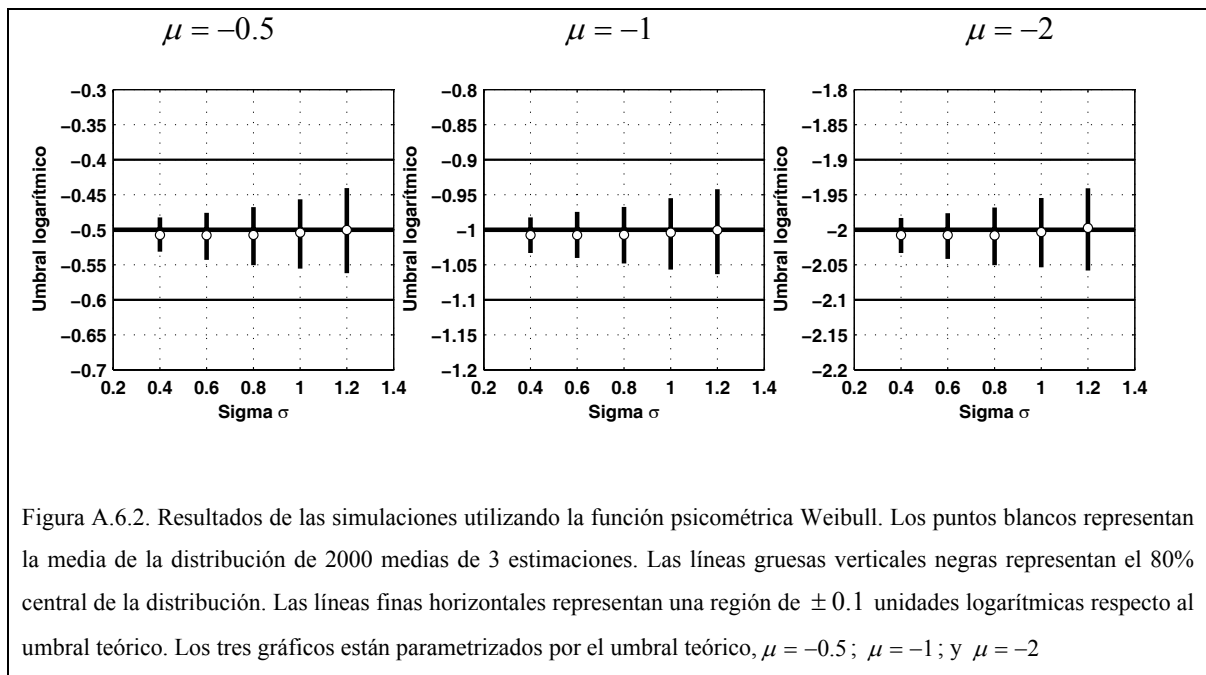


Figura A.6.2. Resultados de las simulaciones utilizando la función psicométrica Weibull. Los puntos blancos representan la media de la distribución de 2000 medias de 3 estimaciones. Las líneas gruesas verticales negras representan el 80% central de la distribución. Las líneas finas horizontales representan una región de ± 0.1 unidades logarítmicas respecto al umbral teórico. Los tres gráficos están parametrizados por el umbral teórico, $\mu = -0.5$; $\mu = -1$; y $\mu = -2$

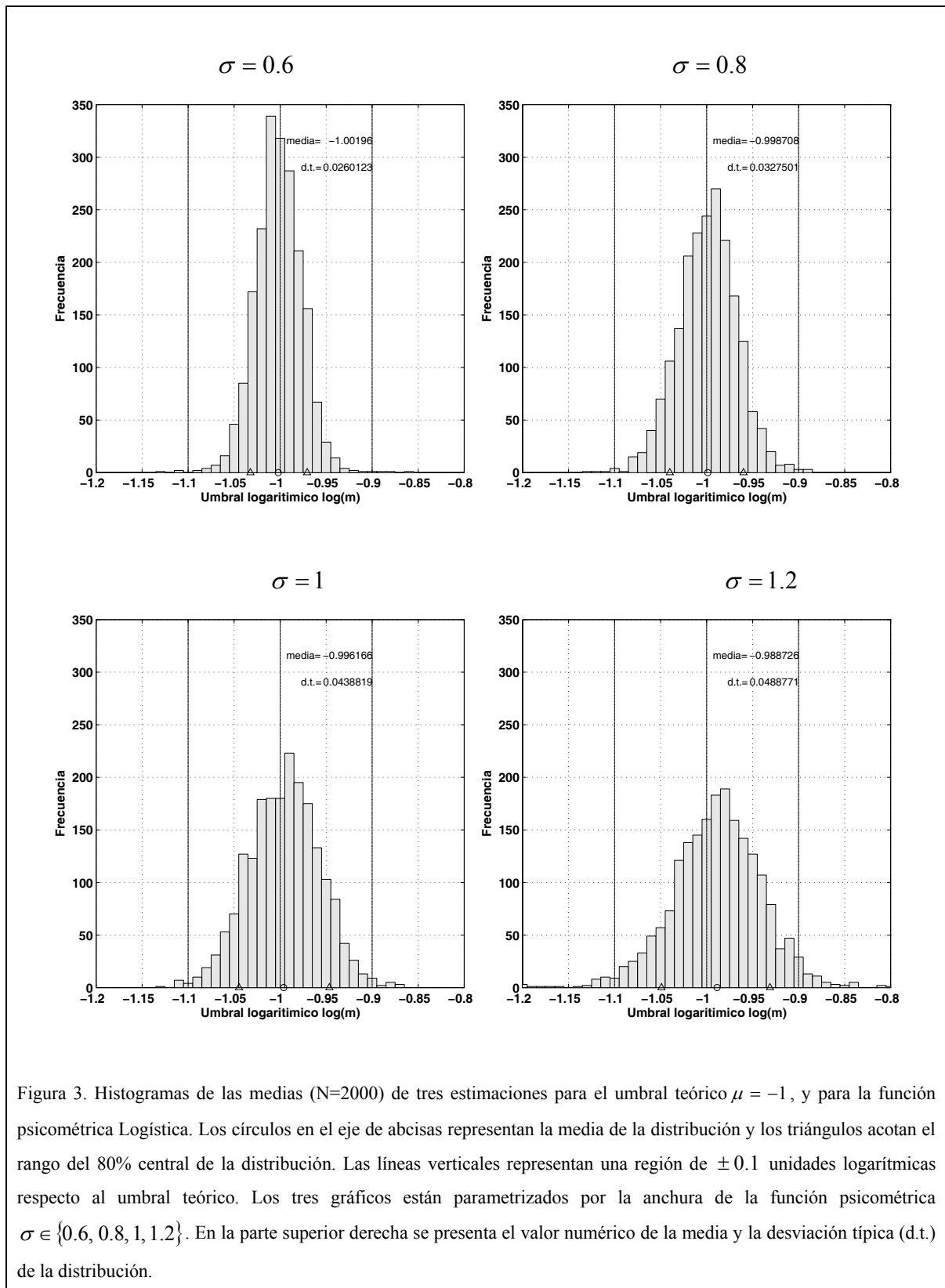


Figura 3. Histogramas de las medias (N=2000) de tres estimaciones para el umbral teórico $\mu = -1$, y para la función psicométrica Logística. Los círculos en el eje de abcisas representan la media de la distribución y los triángulos acotan el rango del 80% central de la distribución. Las líneas verticales representan una región de ± 0.1 unidades logarítmicas respecto al umbral teórico. Los tres gráficos están parametrizados por la anchura de la función psicométrica $\sigma \in \{0.6, 0.8, 1, 1.2\}$. En la parte superior derecha se presenta el valor numérico de la media y la desviación típica (d.t.) de la distribución.

APÉNDICE 7

En este Apéndice se muestran las expresiones formales para las dos FTM-1D propuestas para los canales psicofísicos y sus respectivas integrales definidas. También, se especifica el modelo de enmascaramiento para los distintos tipos de ruido máscara utilizados en los experimentos.

A.7.1. Expresiones de las FTM-1D de los canales psicofísicos visuales

Uno de los supuestos del modelo de enmascaramiento tiene que ver con la forma de las FTM-1D de los canales psicofísicos. Como se ha visto en el capítulo 4 (apartado 4.4) se han propuesto dos funciones para la forma de los filtros:

a) *Función lognormal* (canal asimétrico en escala lineal)

$$|H(u; u_i)| = \begin{cases} \exp\left[-\frac{\ln^2(|u|/u_i)}{2\alpha^2}\right] & \Leftrightarrow u \neq 0 \\ 0 & \Leftrightarrow u = 0, \end{cases}$$

donde u_i es la frecuencia de pico (o de sintonía) del canal i y α está relacionado con la anchura del canal.

b) *Módulo de la transformada de Fourier de una función de Gabor* (canal simétrico en escala lineal)

$$|H(u; u_i)| = \exp[-2\pi^2\sigma^2(u - u_i)^2] + \exp[-2\pi^2\sigma^2(u + u_i)^2],$$

donde u_i es la frecuencia de pico del canal i y el parámetro σ está relacionado con la anchura del canal.

Para la predicción de umbrales mediante el modelo de enmascaramiento y utilizando la función erf definida del siguiente modo

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp[-t^2] dt,$$

se han obtenido las dos integrales definidas siguientes para $u_{\text{sup}} > u_{\text{inf}} > 0$

$$\int_{u_{\text{inf}}}^{u_{\text{sup}}} \exp\left[-\frac{\ln^2(u/u_i)}{\alpha^2}\right] du = \frac{\alpha u_i \sqrt{\pi}}{2} \exp\left[\frac{\alpha^2}{4}\right] \times \left\{ \text{erf}\left[\frac{\ln(u_{\text{sup}}/u_i) - (\alpha^2/2)}{\alpha}\right] - \text{erf}\left[\frac{\ln(u_{\text{inf}}/u_i) - (\alpha^2/2)}{\alpha}\right] \right\}, \quad (\text{A.7.1})$$

y

$$\begin{aligned}
 & \int_{u_{\text{inf}}}^{u_{\text{sup}}} \left[\exp[-4\pi^2 \sigma^2 (u - u_i)^2] + \exp[-4\pi^2 \sigma^2 (u + u_i)^2] + 2 \exp[-4\pi^2 \sigma^2 (u^2 + u_i^2)] \right] du = \\
 & = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} \left[\exp[-4\pi^2 \sigma^2 u_i^2] \times [\text{erf}(2\pi\sigma u_{\text{sup}}) - \text{erf}(2\pi\sigma u_{\text{inf}})] + \frac{1}{2} [\text{erf}(2\pi\sigma(u_{\text{sup}} + u_i)) - \text{erf}(2\pi\sigma(u_{\text{inf}} + u_i))] + \right. \\
 & \left. \frac{1}{2} [\text{erf}(2\pi\sigma(u_{\text{sup}} - u_i)) - \text{erf}(2\pi\sigma(u_{\text{inf}} - u_i))] \right].
 \end{aligned}
 \tag{A.7.2}$$

A.7.2. El modelo de enmascaramiento para diferentes tipos de ruido visual

A continuación se expresa la ecuación del modelo de enmascaramiento para seis tipos de ruido blanco visual máscara (paso-todo, paso-bajo, paso-alto, con muesca espectral, paso-banda y paso-banda doble) utilizados en los experimentos, y para las dos formas propuestas de la FTM-1D de los canales psicofísicos (asimétrica y simétrica).

A.7.2.1. Ruido paso-todo 1D

La expresión formal del modelo de enmascaramiento cuando la tarea es detectar una señal inserta en ruido paso-todo 1D es la siguiente (véase el apartado 4.6.1)

$$m_{f_0}^2(u_0, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

Ahora bien, el espectro de potencia del ruido utilizado en los experimentos no va exactamente desde 0 hasta $+\infty$, en particular el ruido tiene un límite inferior u_{inf} y un límite superior u_{sup} , siendo $u_{\text{inf}} = 0.125$ c/gav y $u_{\text{sup}} = 16$ c/gav. Por lo tanto en realidad tenemos un ruido paso-banda de banda ancha. Por ello, la expresión formal del modelo para un ruido máscara paso-banda es

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{\text{inf}}, u_{\text{sup}}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_{u_{\text{inf}}}^{u_{\text{sup}}} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

La integral de la FTM-1D del canal dentro de los límites inferior y superior está solucionada en el apartado A.7.1 para los dos tipos de funciones propuestas para los canales.

A.7.2.2. Ruido paso-bajo y paso-alto

La expresión del modelo de enmascaramiento cuando la tarea es detectar una señal inserta en ruido paso-bajo es la siguiente

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_0^{u_{PB}} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

Teniendo en cuenta que en la práctica, el límite inferior es $u_{\text{inf}} = 0.125 \text{ c/gav}$, la expresión es idéntica a la utilizada para el ruido paso-todo y para las dos funciones propuestas como forma del canal.

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_{u_{\text{inf}}}^{u_{PB}} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

Cuando la tarea es detectar una señal inserta en ruido paso-alto la expresión final sería

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PA}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_{u_{PA}}^{u_{\text{sup}}} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2},$$

donde $u_{\text{sup}} = 16 \text{ c/gav}$.

La integral de la FTM-1D del canal dentro de los límites inferior y superior está solucionada en el apartado A.7.1 para los dos tipos de funciones propuestas para los canales.

A.7.2.3. Ruido paso-todo con muesca espectral

La expresión del modelo de enmascaramiento cuando la tarea es detectar una señal inserta en ruido paso-todo con muesca espectral es la siguiente

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, u_{PA}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \left[\int_0^{u_{PB}} |H(u; u_k)|^2 du + \int_{u_{PA}}^{+\infty} |H(u; u_k)|^2 du \right]}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

Lo límites inferior y superior son $u_{\text{inf}} = 0.125$ c/gav y $u_{\text{sup}} = 16$ c/gav respectivamente, por lo tanto, la expresión final quedaría del siguiente modo,

$$m_{f_0}^2(u_0, u_{PB}, u_{PA}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \left[\int_{u_{\text{inf}}}^{u_{PB}} |H(u; u_k)|^2 du + \int_{u_{PA}}^{u_{\text{sup}}} |H(u; u_k)|^2 du \right]}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

La integral de la FTM-1D del canal dentro de los límites inferior y superior está solucionada en el apartado A.7.1 para los dos tipos de funciones propuestas para los canales.

A.7.2.4. Ruido paso-banda

La expresión del modelo de enmascaramiento cuando la tarea es detectar una señal inserta en ruido paso-banda es la siguiente

$$m_{f_0}^2(u_0, Bu, u_C, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \int_{u_C - \frac{Bu}{2}}^{u_C + \frac{Bu}{2}} |H(u; u_k)|^2 du}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

La integral de la FTM-1D del canal dentro de los límites inferior y superior está solucionada en el apartado A.7.1 para los dos tipos de funciones propuestas para los canales.

A.7.2.5. Ruido paso-banda doble

La expresión del modelo de enmascaramiento cuando la tarea es detectar una señal inserta en ruido paso-banda doble es la siguiente

$$m_{f_0}^2(u_0, Bu, u_{C\text{inf}}, u_{C\text{sup}}, N_0) = \frac{m_0^2(u_k) + \frac{4N_0}{S} \left[\int_{u_{C\text{inf}} - \frac{Bu}{2}}^{u_{C\text{inf}} + \frac{Bu}{2}} |H(u; u_k)|^2 du + \int_{u_{C\text{sup}} - \frac{Bu}{2}}^{u_{C\text{sup}} + \frac{Bu}{2}} |H(u; u_k)|^2 du \right]}{|H(u_0; u_k)|^2}.$$

La integral de la FTM-1D del canal dentro de los límites inferior y superior está solucionada en el apartado A.7.1 para los dos tipos de funciones propuestas para los canales.

APÉNDICE 8

Control experimental de la técnica de entrelazado

Para descartar un posible artefacto de esta técnica sobre la detección de un enrejado sinusoidal, se realizó un experimento donde se comparó el umbral de detección de un enrejado sinusoidal con ventana gaussiana 2D de frecuencia espacial 8 c/gav utilizando esta técnica y sin ella. El experimento fue realizado por el sujeto IS y la metodología usada en este experimento puede verse descrita en el Capítulo 5.

En la condición de técnica de entrelazado se presentaron de modo alternativo y en frames sucesivos las dos imágenes siguientes: a) imagen de un enrejado sinusoidal; y b) imagen compuesta sólo por luminancia media (véase la Figura A.8.1), es decir,

a) Imagen de un enrejado sinusoidal horizontal

$$L_{\text{sinu}}(x, y) = L_0 [1 + m_f f(x, y)] , \text{ donde } f \text{ es una función sinusoidal.}$$

b) Imagen de luminancia media

$$L_{\text{media}}(x, y) = L_0 [1 + m_f i(x, y)] ,$$

donde $i(x, y) = 0$.

Nótese que si presentamos las dos imágenes mediante la técnica de entrelazado sucede lo siguiente:

$$L_{\text{sinu+media}} = \frac{L_{\text{sinu}} + L_{\text{media}}}{2} ,$$

desarrollando esta expresión se tiene lo siguiente

$$L_{\text{sinu+media}}(x, y) = L_0 \left[1 + \frac{m_f}{2} f(x, y) + \frac{m_f}{2} i(x, y) \right] = L_0 \left[1 + \frac{m_f}{2} f(x, y) \right] .$$

En la condición sin entrelazado se presentó la imagen del enrejado sinusoidal de modo tradicional.

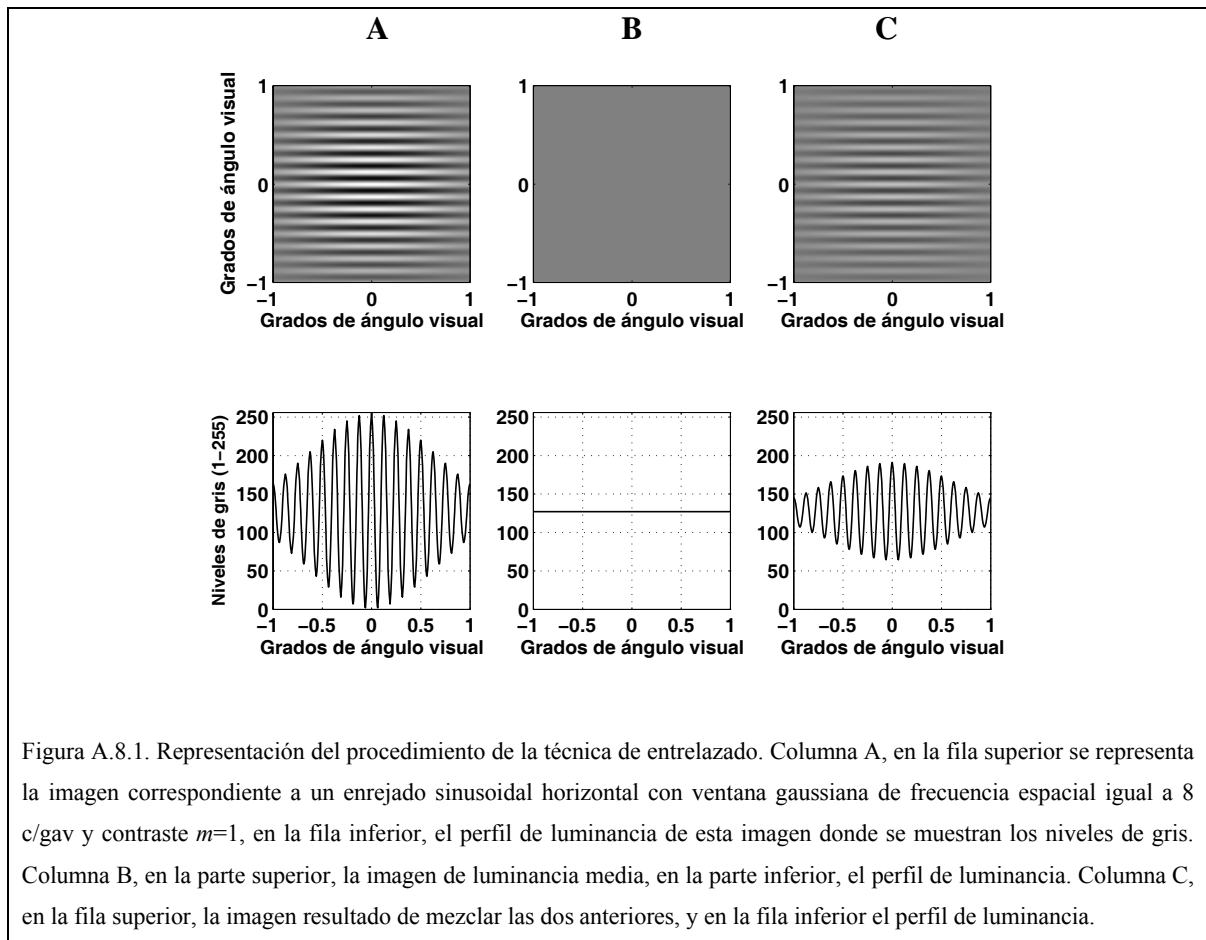


Figura A.8.1. Representación del procedimiento de la técnica de entrelazado. Columna A, en la fila superior se representa la imagen correspondiente a un enrejado sinusoidal horizontal con ventana gaussiana de frecuencia espacial igual a 8 c/gav y contraste $m=1$, en la fila inferior, el perfil de luminancia de esta imagen donde se muestran los niveles de gris. Columna B, en la parte superior, la imagen de luminancia media, en la parte inferior, el perfil de luminancia. Columna C, en la fila superior, la imagen resultado de mezclar las dos anteriores, y en la fila inferior el perfil de luminancia.

Utilizando el procedimiento descrito en el apartado 5.8 se hicieron tres estimaciones de los umbrales por condición. En la Figura A.8.2 se muestran los resultados. En la columna A se muestran las escaleras para los umbrales obtenidos sin la técnica de entrelazado y en la columna B utilizando la técnica de entrelazado (en esta condición los umbrales de contraste obtenidos se multiplicaron por 2). La media y desviación típica de las tres estimaciones de los umbrales de contraste (en unidades logarítmicas) para cada condición son:

	Media	Desv. Típica
Sin entrelazado	-2.0243	0.0210
Con entrelazado	-2.0285	0.0195

Como puede verse los resultados son muy parecidos, con sólo una diferencia entre las medias de 0.0042 unidades logarítmicas.

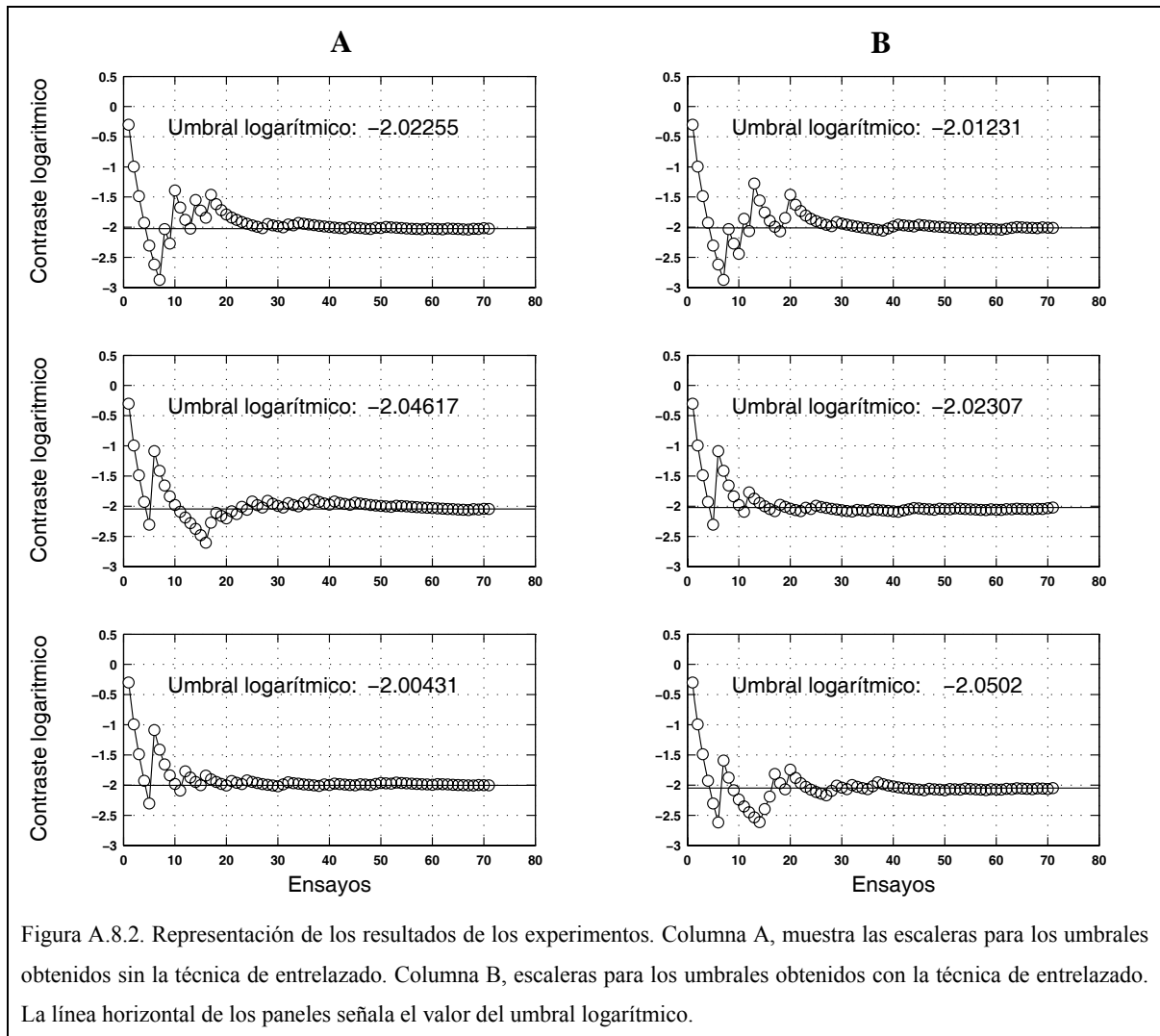


Figura A.8.2. Representación de los resultados de los experimentos. Columna A, muestra las escaleras para los umbrales obtenidos sin la técnica de entrelazado. Columna B, escaleras para los umbrales obtenidos con la técnica de entrelazado. La línea horizontal de los paneles señala el valor del umbral logarítmico.

APÉNDICE 9

A continuación se describe el procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados y el estadístico de bondad de ajuste utilizado en los ajustes de los Capítulos 7 y 8.

A.9.1. Procedimiento de ajuste mediante mínimos cuadrados

Sean unos datos empíricos y_i y un modelo que genera unos datos \hat{y}_i . Lo que se busca es la estimación de los parámetros del modelo $(\alpha, \beta...)$ que minimizan la suma de los errores (residuos) al cuadrado (SSE), es decir, el sumatorio de la diferencia al cuadrado de los datos empíricos y los datos generados por el modelo

$$SSE(\alpha, \beta...) = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i(\alpha, \beta...)]^2, \text{ donde } n \text{ es el número de datos.}$$

Para estimar los parámetros del modelo que minimizan el valor de la ecuación $SSE(\alpha, \beta...)$ se ha utilizado como método de minimización el algoritmo Nelder-Mead (Nelder y Mead, 1965). En particular, se ha utilizado la función “fminsearch” del paquete Matlab.

A.9.2. Estadístico de la bondad de ajuste

Tras ajustar el modelo a los datos empíricos se debe evaluar la bondad de ajuste. Como estadístico para la bondad de ajuste se ha utilizado la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado (RMSE, Root-Mean-Square Error).

$$RMSE(\alpha, \beta...) = \sqrt{\frac{1}{n} SSE(\alpha, \beta...) }.$$

Cuanto menor sea el valor RMSE mejor se ajusta el modelo a los datos empíricos.

Este estadístico por sí sólo no es útil para saber si un modelo se ajusta bien o mal a los datos; sin embargo, lo es para comparar dos o más modelos. En este trabajo, los valores del RMSE suelen ser muy pequeños, por lo que se ha decidido representarlos en unidades logarítmicas ($\log_{10}(\text{RMSE})$).

APÉNDICE 10

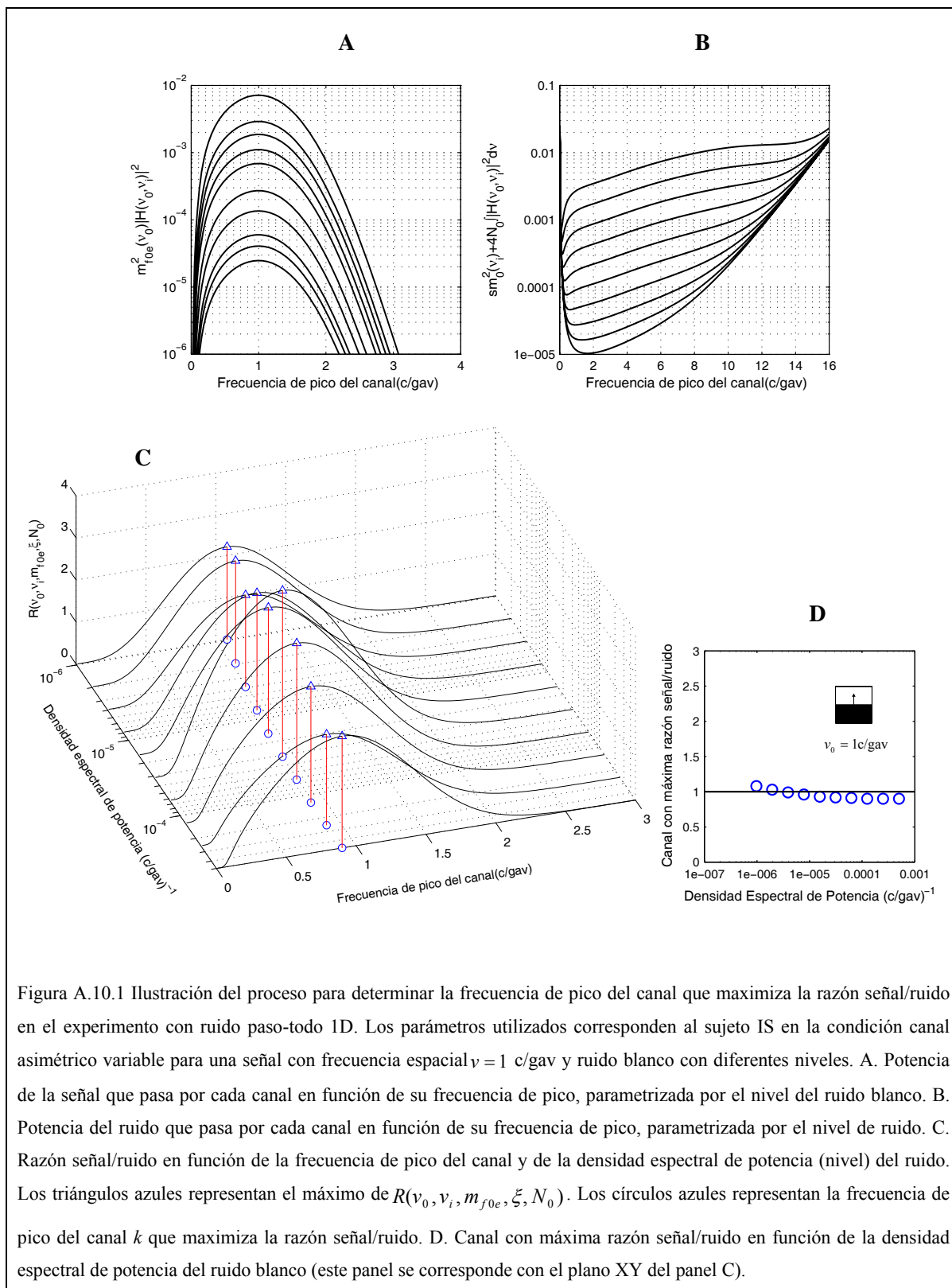
Determinación de la frecuencia de pico del canal que maximiza la razón señal-ruido

En la Figura A.10.1 se muestra un ejemplo detallado del proceso para determinar el canal que maximiza la razón señal/ruido (los datos pertenecen al sujeto IS en la condición canal asimétrico variable). En particular, se presenta el proceso para determinar la frecuencia de pico v_k del canal k que maximiza la razón señal/ruido cuando el experimento consiste en detectar una señal (enrejado sinusoidal con frecuencia espacial $v_0 = 1$ c/gav) inserta en ruido blanco con diez niveles (N_0) o densidades espectrales de potencia diferentes. Los valores s , B y b del modelo de procesamiento, son los parámetros estimados mediante el ajuste de los umbrales empíricos al la ecuación del modelo de enmascaramiento (véase la Figura 7.3.5, sujeto IS) en la última iteración del algoritmo descrito en el apartado 7.3.3. A continuación se describe la información mostrada en cada panel de la Figura A.10.1.

1) En el panel A se representa $m_{f_{0e}}^2(v_0)|H(v_0;v_i)|^2$ en función de la frecuencia de pico del canal i y para diferentes $m_{f_{0e}}^2$, donde $|H(v_0;v_i)|$ es la FTM-1D asimétrica (función lognormal); v_0 es la frecuencia espacial de la señal; v_i es la frecuencia de pico del canal (v_i adopta valores desde 0.01 c/gav hasta 16 c/gav, en pasos de 0.01 c/gav); y $m_{f_{0e}}^2$ es el umbral de detección al cuadrado empírico (Figura 7.3.12) para detectar la señal inserta en ruido blanco 1D con un determinado nivel N_0 .

Nótese que el valor de v_i en el que las gráficas tienen un máximo es independiente del valor de $m_{f_{0e}}^2$. Por lo tanto, el valor de v_k puede ser estimado sin necesidad de conocer el umbral empírico y sólo conociendo el tipo de ruido máscara.

2) En el panel B se representa $sm_0^2(v_i) + 4N_0 \int_0^{+\infty} |H(v;v_i)|^2 dv$, en función de la frecuencia de pico del canal i , donde s es la sensibilidad, m_0^2 es el umbral de detección de la señal en ausencia de ruido externo y, N_0 es el nivel del ruido.



3) En el panel C representa en un gráfico 3D la razón señal/ruido, R ,

$$R(v_0, v_i, m_{f_{0e}}, \xi, N_0) = \frac{m_{f_{0e}}^2(v_0) |H(v_0; v_i)|^2}{sm_0^2(v_i) + 4N_0 \int_0^{+\infty} |H(v; v_i)|^2 dv},$$

en función del nivel del ruido y la frecuencia de pico de los canales. El máximo de cada curva del gráfico C (triángulos azules) es la representación de

$$\max_i \{R(v_0, v_i, m_{f_{0e}}, \xi, N_0)\}.$$

A partir de este máximo se obtiene la frecuencia de pico (v_k) del canal k (círculos azules del panel C) que sería el encargado de detectar la señal inserta en un ruido blanco 1D con un determinado nivel N_0 .

4) Finalmente, en el panel D se representa la frecuencia espacial del canal encargado de detectar la señal inserta en ruido blanco 1D en función del nivel de éste.

REFERENCIAS

- Alcalá-Quintana, R. y García-Pérez, M. A. (2004). The role of parametric assumptions in adaptive bayesian estimation. *Psychological Methods*, 9, 250–271.
- Anderson, A. J. (2003). Utility of a dynamic termination criterion in the ZEST adaptive threshold method. *Vision Research*, 43, 165–170.
- Anderson, S. J., Burr, D. C. y Morrone, M. C. (1991). Two-dimensional spatial-frequency selectivity of motion-sensitive mechanisms in human vision. *Journal of the Optical Society of America*, 8, 1340–1351.
- Arsenault, A. S., Wilkinson, F. y Kingdom, F. A. A. (1999). Modulation frequency and orientation tuning of second-order texture mechanisms. *Journal of the Optical Society of America A*, 16, 427–435.
- Badcock, D. R. y Derrington, A. M. (1989). Detecting the displacements of spatial beats: No role for distortion products. *Vision Research*, 29, 731–739.
- Benton, C. P. y Johnston, A. (1997). First-order motion from contrast modulated noise? *Vision Research*, 37, 3073–3078.
- Bergen, J. R. y Julesz, B. (1983). Parallel versus serial processing in rapid pattern discrimination. *Nature*, 303, 696–698
- Blackwell, K. T. (1998). The effect of white and filtered noise on contrast detection thresholds. *Vision Research*, 38, 267–280.
- Boring, E. G. (1942). *Sensation and Perception in the History of Experimental Psychology*. NY: Appleton-Century-Crofts.

-
- Bracewell, R. N. (1986). *The Fourier Transform and Its Applications*. Second edition, Revised. NY: McGraw-Hill.
- Bradick, O., Campbell, F. W., y Atkinson, J. (1978). Channels in Vision: Basic Aspect. En R. Held, H. W. Leibowitz y H. L. Teuber (eds.), *Handbook of Sensory Physiology. Volumen VIII. Perception*. Berlin: Springer-Verlag. Pp. 3–38.
- Burton, G. J. (1973). Evidence for non-linear response processes in the human visual system from measurements on the thresholds of spatial beat frequencies. *Vision Research*, 13, 1211–1225.
- Campbell, F. W. y Robson, J. G. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 197, 551–566.
- Carlson, C. R., Moeller, J. R. y Anderson, C. H. (1984). Visual illusions without low spatial frequencies. *Vision Research*, 24, 271–274.
- Cavanagh, P. y Mather, G. (1989). Motion: The long and short of it. *Spatial Vision*, 4, 103–129.
- Chubb, C., Econopouly, J. y Landy, M. S. (1994). Histogram contrast analysis and the visual segregation of IID textures. *Journal of the Optical Society of America A*, 11, 2350–2374.
- Chubb, C. y Landy, M. S. (1991). Orthogonal distribution analysis: A new approach to the study of texture perception. En M. S. Landy, J. A. Movshon (eds.). *Computational Models of Visual Processing*. Cambridge, MA.: MIT Press. Pp. 291–301.
- Chubb, C., Olzak, L. y Derrington, A. (2001). Second-order processes in vision: introduction. *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 2175–2178.

-
- Chubb, C. y Sperling, G. (1988). Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 5, 1986–2006.
- Cropper, S. J. (1998). Detection of chromatic and luminance contrast modulation by the visual system. *Journal of the Optical Society of America A*, 15, 1969–1986.
- Dakin, S. C. y Mareschal, I. (2000). Sensitivity to contrast modulation depends on carrier spatial frequency and orientation. *Vision Research*, 40, 311–329.
- Dakin, S. C., Williams, C. B. y Hess, R. F. (1999). The interaction of first- and second-order cues to orientation. *Vision Research*, 39, 2867–2884.
- Dau, T. (1996). *Modeling auditory processing of amplitude modulation*. Tesis Doctoral. Oldenburg: BIS.
- Dau, T. Kollmeier, B. y Kohlrausch, A. (1997a). Modeling auditory processing of amplitude modulation. I. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 2892–2905.
- Dau, T. Kollmeier, B. y Kohlrausch, A. (1997b). Modeling auditory processing of amplitude modulation. II. Spectral and temporal integration in modulation detection. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 2906–2919.
- Daugman, J. G. (1984). Spatial vision channels in the Fourier plane. *Vision Research*, 24, 891–910.
- Daugman, J. G. y Downing, C. J. (1995). Demodulation, predictive coding, and spatial vision. *Journal of the Optical Society of America A*, 4, 641–660.

-
- De Valois, R. L., Albrecht, D. G. y Thorell, L. G. (1982). Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*, 22, 545–559.
- Derrington, A. M. (1987). Distortion products in geniculate X-cells: A physiological basis for masking by spatially modulated gratings? *Vision Research*, 27, 1377–1386.
- Derrington, A. M. y Badcock, D. R. (1986). Detection of spatial beats: non-linearity or contrast increment detection? *Vision Research*, 26, 343–348.
- Derrington, A. M., Badcock, D. R. y Henning, G. B. (1993). Discriminating the direction of second-order motion at short stimulus durations. *Vision Research*, 33, 1785–1794.
- Derrington, A. M. y Henning, G. B. (1989). Some observations on the masking effects of two-dimensional stimuli. *Vision Research*, 29, 241–246.
- Ellemberg, D., Allen, H. A. y Hess, R. F. (2004). Investigating local network interactions underlying first- and second-order processing. *Vision Research*, 44, 1787–1797.
- Emerson, P. L. (1986). Observations on maximum-likelihood and Bayesian methods of forced-choice sequential threshold estimation. *Perception & Psychophysics*, 39, 151–153.
- Ewert, S. D. y Dau, T. (2000). Characterizing frequency selectivity for envelope fluctuations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 108, 1181–1196.
- Felsberg, M. y Sommer, G. (2001). The monogenic signal. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 49, 3136–3144.
- Fletcher, H. (1940). Auditory Patterns. *Reviews of Modern Physics*, 12, 47–65.

-
- Gabor, D. (1946). Theory of communications. *Journal of IEE*, 93, 429–457.
- García-Pérez, M. A. (1998). Forced-choice staircases with fixed step sizes: Asymptotic and small-sample properties. *Vision Research*, 38, 1861–1881.
- García-Pérez, M. A. y Peli, E. (2001). Luminance artifacts of cathode-ray tube displays for vision research. *Spatial Vision*, 14, 201–215.
- García-Pérez, M. A. y Sierra-Vázquez, V. (1995). Deriving channel gains from large-area sine-wave contrast sensitivity data. *Spatial Vision*, 9, 235–260.
- García-Pérez, M. A. y Sierra-Vázquez, V. (1995). Visual processing in the joint spatial/spatial-frequency domain. En E. Peli (ed.), *Vision Models for Target Detection and Recognition*. Singapore: World Scientific.
- García-Pérez, M. A. y Sierra-Vázquez, V. (1996). Do channels shift their tuning towards lower spatial frequencies in the periphery? *Vision Research*, 36, 3339–3372.
- Ginsburg, A. P. (1978). *Visual information processing based on spatial filters constrained by biological data*. Technical Report AMRL-TR-78-129. Aerospace Medical Research Laboratory, Wright Patterson Air Force Base, Dayton, OH.
- Graham, N. V. S (1989). *Visual Pattern Analyzers*. NY: Oxford University Press.
- Graham, N. y Nachmias, J. (1971). Detection of patterns containing two spatial frequencies: a test of single and multichannel models. *Vision Research*, 11, 251–259
- Graham, N., Sutter, A. y Venkatesan, C. (1993). Spatial-frequency and orientation-selectivity of simple and complex channels in region segregation. *Vision Research*, 33, 1893–1911.

-
- Graham, N. y Sutter, A. (1998). Spatial summation in simple (Fourier) and complex (non-Fourier) texture channels. *Vision Research*, 38, 231–257.
- Green, D. M. y Swets, J. A. (1974). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. NY: Robert E. Krieger
- Hahn, S. L. (1996). *Hilbert Transforms in Signal Processing*. Boston, Mass: Artech House.
- Hartmann, W. M. (1998). *Signals, Sound, and Sensation*. N.Y.: Springer-Verlag
- Harvey, Jr., L. O. y Doan, V. V. (1990). Visual masking at different polar angles in the two-dimensional Fourier plane. *Journal of the Optical Society of America A*, 7, 116–127.
- He, S. y McLeod, D. I. A. (1998). Contrast-modulation flicker: dynamics and spatial resolution of the light adaptation process. *Vision Research*, 38, 985–1000.
- Henning, G. B., Hertz, B. G. y Broadbent, D. E. (1975). Some experiments bearing on the hypothesis that the visual system analyses spatial frequency patterns in independent bands of spatial frequency. *Vision Research*, 15, 887–897.
- Henning, G. B., Hertz, B. G. y Hinton, J. L. (1981). Effects of different hypothetical detection mechanisms on the shape of spatial frequency filters inferred from masking experiments: I. Noise masks. *Journal of the Optical Society of America*, 71, 574–581.
- Hess, R. F. y Nordby, K. (1986). Spatial and temporal limits of vision in the achromat. *Journal of Physiology*, 371, 365–385.
- Houtgast, T. (1989). Frequency selectivity in amplitude-modulation detection. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85, 1676–1680.

-
- Hutchinson, C. V. y Ledgeway, T. (2004). Spatial frequency selective masking of first-order and second-order motion in the absence of off-frequency 'looking'. *Vision Research*, *44*, 1499–1510.
- Jamar, J. H. T., Campagne, J. C. y Koenderink, J. J. (1982). Detectability of amplitude and frequency-modulation of suprathreshold sine-wave gratings. *Vision Research*, *22*, 407–416.
- Jamar, J. H. T. y Koenderink, J. J. (1985). Contrast detection and detection of contrast modulation for noise gratings. *Vision Research*, *25*, 511–521.
- Jáñez, L. (1984). Visual grouping without low spatial frequencies. *Vision Research*, *24*, 271–274.
- Jáñez, L. y Sierra-Vázquez, V. (1983). *Análisis de Fourier*. Madrid: Departamento de Psicología Matemática. Madrid, UCM.
- Johnston, A. P y Baker, Jr., C. L. (2004). First- and second-order information in natural images: a filter-based approach to image statistics. *Journal of the Optical Society of America A*, *21*, 913–925.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of cyclopean perception*. Chicago, IL: University of Chicago Press.

-
- Kelly, D. H. (1975). Spatial frequency selectivity in the retina. *Vision Research*, 15, 665–672.
- Kelly, D. H. (1977). Visual contrast sensitivity. *Optica Acta*. 24, 107–129.
- Kelly, D. H. y Burbeck, C. A. (1984). Critical problems in spatial vision. *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 10, 125–177.
- King-Smith, P. E., Grigsby, S. S., Vingrys, A. J., Benes, S. C. y Supowit, A. (1994). Efficient and unbiased modifications of the QUEST threshold method: Theory, simulations, experimental evaluation and practical implementation. *Vision Research*, 34, 885–912.
- Kingdom, F. A. y Keeble, D. (1996). A linear systems approach to the detection of both abrupt and smooth spatial variations in orientation-defined textures. *Vision Research*, 36, 409–420.
- Kingdom, F. A. y Keeble, D. (1999). On the mechanism for scale invariance in orientation-defined textures. *Vision Research*, 39, 1477–1489.
- Kingdom, F. A., Keeble, D. y Moulden, B. (1995). Sensitivity to orientation modulation in micropattern-based textures. *Vision Research*, 35, 79–91.
- Kingdom, F. A., Prins, N. y Hayes, A. (2003). Mechanism independence for texture-modulation detection is consistent with a filter-rectify-filter mechanism. *Visual Neuroscience*, 20, 65–76.
- Klein, S. A., Hu, Q. J. y Carney, T. (1996). The adjacent pixel nonlinearity: problems and solutions. *Vision Research*, 36, 3167–3181.

-
- Kontsevich, L. L. y Tyler, C. W. (1999). Bayesian adaptive estimation of psychometric slope and threshold. *Vision Research*, 39, 2729–2737.
- Kwan, L. y Regan, D. (1998). Orientation-tuned spatial filters for texture-defined form. *Vision Research*, 38, 3849–3855.
- Landy, M. S. y Graham, N. (2003). Visual perception of texture. En L. M. Chalupa y J. S. Tener (eds.). *The Visual Neurosciences*. Vol. 2. Cambridge, MA: MIT Press. Pp. 1106–1118.
- Landy, M. S. y Oruc, I. (2002). Properties of second-order spatial frequency channels. *Vision Research*, 42, 2311–2329.
- Larkin, K. G., Bone, D. J. y Oldfield, M. A. (2001). Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. I. General background of the spiral phase quadrature transform. *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 1862–1870.
- Ledgeway, T. y Smith, A. T. (1994). Evidence for separate motion detecting mechanisms for first- and second-order motion in human vision. *Vision Research*, 34, 2727–2740.
- Legge, G. E. y Foley, J. M. (1980). Contrast masking in human vision. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 1458–1471.
- Legge, G. E., Kersten, D. y Burgess, A. E. (1987). Contrast discrimination in noise. *Journal of the Optical Society of America A*, 4, 391–404.
- Lin, L. M. y Wilson, H. R. (1996). Fourier and non-Fourier pattern discrimination compared. *Vision Research*, 36, 1907–1918.

- López-Bascuas, L. E. (1999). El sonido y la arquitectura del sistema auditivo humano. En E. Munar, J. Roselló y A. Sánchez-Cabaco (coords.), *Atención y Percepción*. Madrid: Alianza Editorial. Pp. 447–487.
- Losada, M. A. y Mullen, K. T. (1995). Color and luminance spatial tuning estimated by noise masking in the absence of off-frequency looking. *Journal of the Optical Society of America A*, 12, 250–260.
- Loughlin, P. J y Tacer, B. (1996). On the amplitude- and frequency-modulation decomposition of signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 1594–1601.
- Lu, Z. y Sperling, G. (1996). Contrast gain control in first- and second-order motion perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 13, 2305–2318.
- Lu, Z. y Sperling, G. (1996). Second-order illusions: Mach bands, Chevreul, and Craik-O'Brien-Cornsweet. *Vision Research*, 36, 559–572.
- Lu, Z. y Sperling, G. (2001). Three-systems theory of human visual motion perception: review and update. *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 2331–2370.
- Madigan, R. y Williams, D. (1987). Maximum-likelihood psychometric procedures in two-alternative forced-choice: Evaluation and recommendations. *Perception & Psychophysics*, 42, 240–249.
- Majaj, N. J., Pelli, D. G., Kurshan, P. y Palomares, M. (2002). The role of spatial frequency channels in letter identification. *Vision Research*, 42, 1165–1184.
- Malik, J. y Perona, P. (1990). Preattentive texture discrimination with early visual mechanisms. *Journal of the Optical Society of America A*, 7, 923–932.

-
- Manahilov, V., Calvert, J. y Simpson, W. A. (2003). Temporal properties of the visual responses to luminance and contrast modulated noise. *Vision Research*, *43*, 1855–1867.
- Maragos, P. y Bovik, A. C. (1995). Image demodulation using multidimensional energy separation. *Journal of the Optical Society of America A*, *12*, 1867–1875.
- Mareschal, I. y Baker, C. L., Jr. (1998a). A cortical locus for the processing of contrast-defined contours. *Nature Neuroscience*, *1*, 150–154.
- Mareschal, I. y Baker, C. L., Jr. (1998b). Temporal and spatial responses to second-order stimuli in cat area 18. *Journal of Neurophysiology*, *80*, 2811–2873.
- Mareschal, I. y Baker, C. L., Jr. (1999). Cortical processing of second-order motion. *Visual Neuroscience*, *16*, 527–540.
- Moore, B. C. J. (1997). *An Introduction to the Psychology of Hearing*. N. Y.: Academic Press. 4ª edición.
- Moore, B. C. J. y Glasberg, B. R. (1983). Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. *Journal of the Acoustical Society of America*, *74*, 750–753.
- Morrone, M. C y Burr, D. C. (1988). Feature detection in human vision: A phase-dependent energy model. *Proceedings of the Royal Society of London B*, *235*, 221–245.
- Mussap, A. J. (2001). Orientation integration in detection and discrimination of contrast-modulated patterns. *Vision Research*, *41*, 295–311.
- Nachmias, J. (1981). On the psychometric function for contrast detection. *Vision Research*, *21*, 215–223.

-
- Nachmias, J. y Rogowitz, B. (1983). Masking by spatially modulated gratings. *Vision Research*, 23, 1621–1630.
- NAG (1995). *NAG Fortran Library Manual, Mark 17*. Oxford: Numerical Algorithms Group.
- Nelder, J. A. y Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 7, 308–313.
- Oppenheim, A. V., Willsky, A. V. y Hamid Nawab, S. (1998). *Señales y Sistemas*. Mexico: Prentice-Hall.
- Papoulis, A. (1962). *The Fourier Integral and its Applications*. NY: McGraw-Hill.
- Papoulis, A. (1968). *Systems and Transforms with Applications in Optics*. (N. Y.: McGraw-Hill).
- Patterson, R. D. (1974). Auditory filter shape. *Journal of the Acoustical Society of America*, 55, 802-809.
- Patterson, R. D. (1976). Auditory filter shapes derived with noise stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 59, 640–654.
- Patterson, R. D. y Nimmo-Smith, I. (1980). Off-frequency listening and the auditory filter asymmetry. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 229–241.
- Pelli, D. G. (1981). Effects of visual noise. Tesis Doctoral. Cambridge, GB: Cambridge University.

-
- Pelli, D. G. y Farell, B. (1999). Why use noise? *Journal of the Optical Society of America A*, 16, 647–653.
- Pentland, A. (1980). Maximum likelihood estimation: The best PEST. *Perception & Psychophysics*, 28 (4), 377–379.
- Perkins, M. E. y Landy, M. S. (1991). Nonadditivity of masking by narrow-band noises. *Vision Research*, 31, 1053–1065.
- Sachs, M. B., Nachmias, J. y Robson, J. G. (1971). Spatial-frequency channels in human vision. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 1176–1971.
- Schofield, A. J. (2000). What does second-order vision see in an image? *Perception*, 29, 1071–1086.
- Schofield, A. J. y Georgeson, M. A. (1999). Sensitivity to modulations of luminance and contrast in visual white noise: separate mechanisms with similar behaviour. *Vision Research*, 39, 2697–2716.
- Schofield, A. J. y Georgeson, M. A. (2003). Sensitivity to contrast modulation: the spatial frequency dependence of second-order vision. *Vision Research*, 43, 243–259.
- Scott-Samuel, N. E. y Georgeson, M. A. (1999). Does early nonlinearity account for second-order motion? *Vision Research*, 39, 2853–2865.
- Serrano-Pedraza, I. y Sierra-Vázquez, V. (2005). *El paradigma de enmascaramiento con ruido visual: Simulación del modelo basado en bandas críticas*. Enviado para su publicación.

-
- Serrano-Pedraza, I. y Sierra-Vázquez, V. (2003). Vision reaction time to second-order stimuli. *26th European Conference on Visual Perception*, París. *Perception*, 32 (Suppl.), 165.
- Sierra-Vázquez, V. y Serrano-Pedraza, I. (2003). Image amplitude demodulation in the Müller-Lyer illusion. *34th European Mathematical Psychology Group Meeting*. Madrid.
- Sierra-Vázquez, V y Serrano-Pedraza, I. (2004). Riesz transforms for single-band isotropic envelope estimation of Müller-Lyer illusion images. *27th European Conference on Visual Perception*, Budapest. *Perception*, 33 (Suppl.), 81.
- Sierra-Vázquez, V., Serrano-Pedraza, I. y Luna, D. (2005). The effect of spatial-frequency filtering on the visual processing of global structure. Enviado para su publicación.
- Skottun, B. C. (2000). Amplitude and phase in the Müller-Lyer illusion. *Perception*, 29, 201–209.
- Smith, A. T., Greenlee, M. W., Singh, K. D., Kraemer, F. M. y Hennig, J. (1998). The processing of first- and second-order motion in human visual cortex assessed by functional magnetic resonance imaging (fMRI). *Journal of Neuroscience*, 18, 3816–3830.
- Smith, A. T. y Scott-Samuel, N. E. (2001). First-order and second-order signals combine to improve perceptual accuracy. *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 2267–2272.

-
- Smith, A. T. y Ledgeway, T. (1997). Separate detection of moving luminance and contrast modulations: fact or artefact? *Vision Research*, 37, 45–62.
- Smith, A. T. y Ledgeway, T. (1998). Sensitivity to second-order motion as a function of temporal frequency and eccentricity. *Vision Research*, 38, 403–410.
- Solomon, J. A. (2000). Channel selection with non-white-noise mask. *Journal of the Optical Society of America A*, 17, 986–993.
- Solomon, J. A. y Pelli, D. G. (1994). The visual filter mediating letter identification. *Nature*, 369, 395–397.
- Solomon, J. A. y Sperling, G. (1994). Full-wave and half-wave rectification in second-order motion perception. *Vision Research*, 34, 2239–2257.
- Stein, E. M. (1970). *Singular Integrals and Differentiability Properties of Functions*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Stromeyer III, C. F. y Julesz, B. (1972). Spatial-frequency masking in vision: critical bands and spread of masking. *Journal of the Optical Society of America*, 62, 1221–1232.
- Stromeyer III, C. F. y Klein, S. (1975). Evidence against narrow-band spatial frequency channels in human vision: The detectability of frequency modulated gratings. *Vision Research*, 15, 899–910.
- Sutter, A., Beck, J. y Graham, N. (1989). Contrast and spatial variables in texture segregation: testing a simple spatial-frequency channels model. *Perception & Psychophysics*, 46, 312–332.

-
- Sutter, A., Sperling, G. y Chubb, C. (1995). Measuring the spatial frequency selectivity of second-order texture mechanisms. *Vision Research*, 35, 915–924.
- Talgar, C. P., Pelli, D. G. y Carrasco, M. (2004). Covert attention enhances letter identification without affecting channel tuning. *Journal of Vision*, 4, 22–31.
- Treutwein, B. (1995). Adaptive psychophysical procedures. *Vision Research*, 35, 2503–2522.
- Watson, A. B. y Pelli, D. G. (1983). QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception & Psychophysics*, 33, 113–120.
- Wichmann, B. A. y Hill, I. D. (1982). Algorithm AS 183. An efficient and portable pseudo-random number generator. *Applied Statistics*, 31, 188–190.
- Wichmann, F. A. y Hill, N. J. (2001). The psychometric function: I. Fitting, sampling, and goodness of fit. *Perception & Psychophysics*, 63, 1293–1313.
- Wilson, H. R. (1999). Non-Fourier cortical processes in texture, form, and motion perception. *Cerebral Cortex*, 13, 445–477.
- Wilson, H. R., Ferrera, V. P. y Yo, C. (1992). A psychophysically motivated model for two-dimensional motion perception. *Vision Neuroscience*, 9, 79–97.
- Wilson, H. R. y Giese, S. C. (1977). Threshold visibility of frequency gradient patterns. *Vision Research*, 17, 1177–1190.
- Wilson, H. R., McFarlane, D. K. y Phillips, G. C. (1983). Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking. *Vision Research*, 23, 873–882.

Zhou, Y. X. y Baker, C. L. Jr. (1993). A processing stream in mammalian visual cortex neurons for non-Fourier responses. *Science*, 261, 98–101.

Zhou, Y. X. y Baker, C. L. Jr. (1994). Envelope-responsive neurons in areas 17 and 18 of cat. *Journal of Neurophysiology*, 72, 2134–2150.