

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE ESTOMATOLOGÍA
FACULTAD DE ODONTOLOGÍA



**“BLANQUEAMIENTO DENTAL: ESTUDIO CLÍNICO PARA EL
DESARROLLO DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS E INTELIGENTES PARA
LA PREDICCIÓN DEL CAMBIO CROMÁTICO”**

TESIS DOCTORAL

Janiley Santana Díaz
Granada-2010

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Janiley Santana Díaz
D.L.: GR 2387-2010
ISBN: 978-84-693-1321-3

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE ESTOMATOLOGÍA
FACULTAD DE ODONTOLOGÍA



**“BLANQUEAMIENTO DENTAL: ESTUDIO CLÍNICO PARA EL
DESARROLLO DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS E INTELIGENTES PARA
LA PREDICCIÓN DEL CAMBIO CROMÁTICO”**

MEMORIA PRESENTADA POR:
Janiley Santana Díaz

DIRIGIDA POR:
Prof^a. Dña. Rosa María Pulgar Encinas
Prof^a. Dña. María del Mar Pérez Gómez
Prof. D. Luis Javier Herrera Maldonado

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE ESTOMATOLOGÍA
FACULTAD DE ODONTOLOGÍA



**“BLANQUEAMIENTO DENTAL: ESTUDIO CLÍNICO PARA EL
DESARROLLO DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS E INTELIGENTES PARA
LA PREDICCIÓN DEL CAMBIO CROMÁTICO”**

Memoria presentada por Janiley Santana Díaz, para optar
al grado de Doctora en Odontología.

Fdo. Janiley Santana Díaz

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE ESTOMATOLOGÍA
FACULTAD DE ODONTOLOGÍA



El trabajo de investigación que se expone en la siguiente Tesis, titulada "BLANQUEAMIENTO DENTAL: ESTUDIO CLÍNICO PARA EL DESARROLLO DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS E INTELIGENTES PARA LA PREDICCIÓN DEL CAMBIO CROMÁTICO", ha sido realizado bajo nuestra dirección por la Licenciada Doña Janiley Santana Díaz durante el periodo de tiempo correspondiente entre los años 2007 y 2009.

Una vez redactada, la presente Memoria ha sido revisada y es adecuada para ser presentada y permitir a la doctoranda aspirar al título de Doctora ante el Tribunal que en su día se designe.

Y para que conste, en cumplimiento de las disposiciones vigentes, se expide la presente en Granada a 11 de Enero de 2010,

Rosa Pulgar Encinas

Profesora Titular
Dpto. de Estomatología
Facultad de Odontología
Universidad de Granada

María del Mar Pérez Gómez

Catedrática de Escuela
Universitaria
Dpto. de Óptica
Facultad de Ciencias
Universidad de Granada

Luis Javier Herrera Maldonado

Profesor Contratado Doctor
Dpto. de Arquitectura y Tecnología
de Computadores
Facultad de Informática
Universidad de Granada

*A todos los que me han ayudado y
apoyado durante la realización de este trabajo.*

Agradecimientos

Quisiera empezar expresando mi más sincero agradecimiento a los directores de la presente memoria, Rosa, María del Mar y Luis Javier, por compartir conmigo sus conocimientos y ayudarme a realizar este trabajo. Gracias por vuestra enorme paciencia y dedicación.

En segundo lugar, quisiera agradecer también la colaboración de los voluntarios que han participado en el estudio, porque sin ellos, la realización de este trabajo tampoco habría sido posible.

A mis compañeros del Departamento de Óptica, Razvan, Ana Ionescu, Juancho, Laura, Ana Yebra, Arafa, Alicia y Luis, por la ayuda que me han brindado en todo momento. Gracias también a la colaboración de Cristina Lucena, del Departamento de Estomatología, y a los compañeros del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, Jesús, Alberto, Ignacio y Héctor.

A los Departamentos de Estomatología y de Óptica de la Universidad de Granada, por ofrecernos sus instalaciones y permitirnos utilizar todo el equipamiento e instrumental necesario para la realización de este trabajo.

A Antonio, quien apareció en mi vida cuando ya había comenzado a andar este laborioso camino y aún sigue a mi lado. Gracias por el apoyo y el ánimo que me has brindado en todo momento, gracias también por confiar en mí y no fallarme cuando más lo he necesitado.

Finalmente, quisiera expresar mi gratitud a mi familia, a Miguel, David, Ana y demás amistades, compañeros de trabajo y a todos aquellos que han seguido atentamente el desarrollo de este estudio.

Índice general

Presentación.....	1
Capítulo I: Introducción.....	5
I.1. Generalidades sobre el color.....	8
I.1.1. Concepto de color.....	8
I.1.2. Percepción del color.....	9
I.1.2.1. El ojo humano como receptor del color.....	10
I.1.2.2. La fuente de luz.....	11
I.1.2.3. El objeto de observación.....	12
I.1.3. Espacios de representación del color.....	13
I.1.3.1. Sistema de ordenación cromática de Munsell.....	13
I.1.3.2. Espacio cromático CIE1931 (x,y,Y).....	14
I.1.3.3. Espacio cromático CIE1976 (CIELAB).....	15
I.1.4. Umbrales de discriminación cromática.....	20
I.1.5. Índices de blanqueamiento.....	22
I.2. Color en Odontología.....	23
I.2.1. Propiedades ópticas de los dientes.....	24
I.2.1.1. Pulpa dental.....	24
I.2.1.2. Dentina.....	24
I.2.1.3. Esmalte.....	26
I.2.2. Espacio cromático dental.....	27
I.2.3. Medición del color en Odontología.....	30
I.2.3.1. Medición del color mediante guías dentales.....	31
I.2.3.1.1. Vitapan Classical®.....	32
I.2.3.1.2. Vitapan 3D Master®.....	33
I.2.3.1.3. Chromascop®.....	34
I.2.3.1.4. Vita Bleachedguide 3D Master®.....	35
I.2.3.2. Medición del color mediante sistemas instrumentales.....	35
I.2.3.2.1. Colorímetros dentales.....	36
I.2.3.2.2. Espectrofotómetros dentales.....	37
I.2.3.2.3. Sistemas de análisis digital.....	38

I.2.3.2.4. Sistemas híbridos.....	39
I.3. Blanqueamiento Dental.....	40
I.3.1. Patología de las discoloraciones dentales.....	41
I.3.1.1. Discoloraciones vinculadas a la placa dental.....	41
I.3.1.1.1. Microbianas.....	41
I.3.1.1.2. Alimentarias.....	41
I.3.1.1.3. Tabáquicas.....	42
I.3.1.1.4. Laborales.....	42
I.3.1.1.5. Iatrogénicas.....	42
I.3.1.2. Discoloraciones del esmalte.....	42
I.3.1.2.1. Ocurridas durante la formación del diente.....	42
I.3.1.2.2. Ocurridas cuando el diente ya ha erupcionado.....	43
I.3.1.3. Discoloraciones del esmalte y la dentina.....	44
I.3.1.3.1. Ocurridas durante la formación del diente.....	44
I.3.1.3.2. Por afectación del diente erupcionado.....	45
I.3.1.4. Discoloraciones de la dentina.....	45
I.3.1.4.1. Ocurridas durante la formación del diente.....	45
I.3.1.4.2. Por afectación del diente erupcionado.....	47
I.3.2. Tratamiento de las discoloraciones dentales.....	48
I.3.3. Historia del Blanqueamiento Dental.....	48
I.3.4. Concepto de Blanqueamiento Dental.....	50
I.3.4.1. Indicaciones del Blanqueamiento Vital.....	51
I.3.4.2. Contraindicaciones del Blanqueamiento Vital.....	51
I.3.4.3. Agentes blanqueadores y mecanismo de acción.....	51
I.3.4.4. Técnicas de Blanqueamiento Vital.....	53
I.3.4.4.1. Blanqueamiento Vital en la clínica dental.....	53
I.3.4.4.2. Blanqueamiento ambulatorio.....	55
I.3.4.4.3. Blanqueamiento combinado.....	56
I.3.4.5. Efectos adversos del Blanqueamiento Vital y su prevención.....	56
I.3.4.6. Limitaciones del tratamiento blanqueador.....	59
I.4. Modelos predictivos en Biomedicina.....	61
I.4.1. Bioestadística.....	61

I.4.2. Técnicas de Inteligencia Artificial.....	62
I.4.2.1. Redes Neuronales Artificiales (RNA).....	62
I.4.2.2. Lógica Difusa.....	63
Capítulo II: Objetivos.....	67
Capítulo III: Material y Método.....	71
III.1. Material.....	74
III.1.1. Población de estudio.....	74
I.1.1.1. Grupo 1: Pacientes Normales.....	74
I.1.1.2. Grupo 2: Pacientes Tetraciclínicos.....	75
III.1.2. Material Odontológico.....	75
III.1.2.1. Material y equipamiento dentales utilizados en la clínica dental.....	75
III.1.2.1.1. Equipo dental.....	76
III.1.2.1.2. Material de exploración.....	76
III.1.2.1.3. Material para profilaxis.....	76
III.1.2.1.4. Material para impresiones y modelos de trabajo.....	77
III.1.2.1.5. Material para confeccionar las férulas posicionadoras y de blanqueamiento.....	77
III.1.2.1.6. Material para el blanqueamiento dental.....	78
III.1.2.2. Material dental utilizado en el laboratorio.....	78
III.1.3. Dispositivos de medida del color dental.....	79
III.1.3.1. Mentonera.....	79
III.1.3.2. Fuente de luz.....	79
III.1.3.3. Espectrorradiómetro.....	80
III.1.3.4. Guía Vitapan Classical®.....	82
III.1.4. Soporte informático.....	82
III.2. Método.....	83
III.2.1. Metodología Odontológica.....	83
III.2.2. Metodología Colorimétrica.....	86
III.2.3. Método de análisis de los resultados.....	88
III.2.3.1. Fórmulas de diferencia de color e índices de blanqueamiento.....	88
III.2.3.2. Regresión y correlación lineal.....	89
III.2.3.2.1. Recta de regresión de mínimos cuadrados.....	90

III.2.3.2.2. Coeficientes de correlación lineal y de determinación.....	92
III.2.3.2.3. Error estándar en la estimación.....	93
III.2.3.3. Análisis de la varianza ANOVA.....	94
III.2.3.4. Lógica Difusa.....	96
III.2.3.4.1. Conjunto difuso y Función de pertenencia.....	97
III.2.3.4.2. Razonamiento aproximado: Reglas difusas e Inferencia difusa.....	99
III.2.3.4.2.1. Regla difusa.....	99
III.2.3.4.2.2. Inferencia difusa en una regla.....	100
III.2.3.4.2.3. Inferencia difusa en un sistema de reglas.....	102
III.2.3.4.3. Optimización de un sistema difuso basado en reglas para modelado de datos.....	103
III.2.3.4.3.1. Optimización de un sistema difuso a partir de un conjunto de reglas con antecedentes fijados.....	104

Capítulo IV: Resultados..... 107

IV.1. Resultados colorimétricos.....	110
IV.1.1. Pacientes Normales.....	110
IV.1.2. Pacientes Tetraciclínicos.....	120
IV.1.3. Guía Vitapan Classical®.....	129
IV.2. Análisis estadístico sobre la influencia de variables exógenas en el proceso de blanqueamiento.....	131
IV.2.1. ANOVA para Pacientes Normales.....	131
IV.2.2. ANOVA para Pacientes Tetraciclínicos.....	134
IV.3. Modelos lineales para la predicción del cambio cromático en el espacio CIELAB.....	137
IV.3.1. Modelos lineales para Pacientes Normales.....	137
III.3.1.1. Modelos lineales multivariantes.....	137
III.3.1.2. Modelos lineales univariantes.....	139
IV.3.2. Modelos lineales para Pacientes Tetraciclínicos.....	143
III.3.2.1. Modelos lineales multivariantes.....	143
III.3.2.2. Modelos lineales univariantes.....	144
IV.4. Lógica difusa para la predicción del cambio cromático tras el blanqueamiento dental.....	147
IV.4.1. Enfoque difuso para la identificación de tonos VITA en CIELAB e Inferencia difusa para la predicción del cambio cromático.....	147

IV.4.1.1. Establecimiento del problema y diseño de reglas difusas.....	149
IV.4.1.2. Optimización de sistemas difusos: enfoque para la obtención de modelado local y global simultáneo.....	149
IV.4.1.3. Construcción de un sistema difuso basado en la guía Vitapan Classical®.....	153
Capítulo V: Discusión.....	157
V.1. Evaluación colorimétrica en el proceso de blanqueamiento dental.....	159
V.2. Predicción del cambio cromático tras el blanqueamiento dental usando modelos lineales basados en CIELAB.....	170
V.3. Inferencia difusa para la predicción del cambio cromático tras el blanqueamiento dental.....	179
Capítulo VI: Conclusiones.....	185
Capítulo VII: Anexos.....	191
Capítulo VIII: Bibliografía.....	205
Capítulo IX: Producción Científica.....	219

Índice de Figuras

<i>Figura I.1.</i> Espectro de diferentes colores a través de un prisma de vidrio.....	9
<i>Figura I.2.</i> Dimensiones del color.....	13
<i>Figura I.3.</i> Diagrama cromático del espacio CIE1931.....	14
<i>Figura I.4.</i> Sistema CIELAB.....	15
<i>Figura I.5.</i> Espacio cromático CIE L*C*h*.....	17
<i>Figura I.6.</i> Representación del croma C^* y el ángulo de tono h°	17
<i>Figura I.7.</i> Elipses de discriminación de MacAdam.....	21
<i>Figura I.8.</i> Estructura esquemática de un molar.....	24
<i>Figura I.9.</i> Interacción de luz en un diente.....	25
<i>Figura I.10.</i> Valores L*C*h* y CIELAB del diente natural más claro en comparación con el diente natural más oscuro.....	27
<i>Figura I.11.</i> Posición del espacio cromático dental dentro de los espacios cromáticos CIELAB y CIE L*C*h*.....	28
<i>Figura I.12.</i> Guía Vitapan Classical® de Vita.....	32
<i>Figura I.13.</i> Distribución de las tablillas de la guía Vitapan Classical® en el espacio cromático dental.....	33
<i>Figura I.14.</i> Guía Vitapan 3D Master® de Vita.....	34
<i>Figura I.15.</i> Distribución de las tablillas de la Vitapan 3D Master® en el espacio cromático dental.....	34
<i>Figura I.16.</i> Guía Chromascop® de Ivoclar Vivadent.....	35
<i>Figura I.17.</i> Guía Vita Bleachedguide 3D Master®.....	35
<i>Figura I.18.</i> Espectrofotómetro Easyshade® de Vita.....	37
<i>Figura I.19.</i> ShadeVision System® (X-Rite).....	39
<i>Figura I.20.</i> Imagen de un paciente con tinción por tetraciclinas.....	44
<i>Figura III.1.</i> Kit de blanqueamiento entregado a todos los pacientes.....	78
<i>Figura III.2.</i> Mentonera.....	79
<i>Figura III.3.</i> Shade Light® de Kerr.....	80
<i>Figura III.4.</i> Espectrorradiómetro SpectraScan PR-704/PC® de Photo Research.....	81
<i>Figura III.5.</i> Esquema de los componentes del espectrorradiómetro SpectraScan PR-704/PC®.....	81
<i>Figura III.6.</i> Relación y códigos numéricos de las variables exógenas estudiadas.....	84
<i>Figura III.7.</i> Modelos pintados con el espaciador.....	85
<i>Figura III.8.</i> Férula posicionadora.....	85
<i>Figura III.9.</i> Toma de color con el espectrorradiómetro SpectraScan PR-704® y la lámpara Shade Light®.....	87

<i>Figura III.10.</i> Función de pertenencia.....	98
<i>Figura IV.1.</i> Representación de la coordenada L^* para el paciente EV.....	112
<i>Figura IV.2.</i> Representación de la coordenada a^* para el paciente EV.....	112
<i>Figura IV.3.</i> Representación de la coordenada b^* para el paciente EV.....	113
<i>Figura IV.4.</i> Representación de la coordenada L^* para el paciente RC.....	113
<i>Figura IV.5.</i> Representación de la coordenada a^* para el paciente RC.....	113
<i>Figura IV.6.</i> Representación de la coordenada b^* para el paciente RC.....	114
<i>Figura IV.7.</i> Representación de los valores medios de las coordenadas a^* y b^* para todos los dientes del grupo de pacientes normales.....	114
<i>Figura IV.8.</i> Representación de los valores medios de las coordenadas a^* y L^* para todos los dientes del grupo de pacientes normales.....	114
<i>Figura IV.9.</i> Representación, en coordenadas polares, de los valores medios de C^* y h° obtenidos para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.....	115
<i>Figura IV.10.</i> Vista parcial del plano a^* y b^* de CIELAB de las mediciones de color.....	117
<i>Figura IV.11.</i> Vista parcial del plano a^* y L^* de CIELAB de las mediciones de color.....	117
<i>Figura IV.12.</i> Histograma de las variaciones en la coordenada a^* (Δa^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.....	118
<i>Figura IV.13.</i> Histograma de las variaciones en la coordenada b^* (Δb^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.....	118
<i>Figura IV.14.</i> Histograma de las variaciones en la coordenada L^* (ΔL^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.....	119
<i>Figura IV.15.</i> Histograma de las variaciones en EW^* (ΔEW^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.....	119
<i>Figura IV.16.</i> Representación de la coordenada L^* para el paciente PG.....	122
<i>Figura IV.17.</i> Representación de la coordenada a^* para el paciente PG.....	122
<i>Figura IV.18.</i> Representación de la coordenada b^* para el paciente PG.....	122
<i>Figura IV.19.</i> Representación de los valores medios de las coordenadas a^* y b^* para todos los dientes del grupo de pacientes tetraciclínicos.....	123
<i>Figura IV.20.</i> Representación de los valores medios de las coordenadas a^* y L^* para todos los dientes del grupo de pacientes tetraciclínicos.....	123
<i>Figura IV.21.</i> Representación, en coordenadas polares, de los parámetros C^* y h° obtenidos para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	123
<i>Figura IV.22.</i> Vista parcial del plano a^* y b^* de CIELAB de las mediciones de color.....	126
<i>Figura IV.23.</i> Vista parcial del plano a^* y L^* de CIELAB de las mediciones de color.....	126
<i>Figura IV.24.</i> Histograma de las variaciones en la coordenada a^* (Δa^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	127
<i>Figura IV.25.</i> Histograma de las variaciones en la coordenada b^* (Δb^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	127
<i>Figura IV.26.</i> Histograma de las variaciones en la coordenada L^* (ΔL^*) durante el tratamiento para	

todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	128
<i>Figura IV.27.</i> Histograma de las variaciones en la coordenada $EW^*(\Delta EW^*)$ durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	128
<i>Figura IV.28.</i> Representación de la distribución de los datos colorimétricos correspondientes a los dientes y las tablillas de la guía Vitapan Classical® en el plano $a*b^*$	130
<i>Figura IV.29.</i> Representación de la distribución de los datos colorimétricos correspondientes a los dientes y las tablillas de la guía Vitapan Classical® en el plano $b*L^*$	130
<i>Figura IV.30.</i> Variación del índice de blanqueamiento EW^* en función del valor inicial para dicho índice, y aproximación del modelo lineal univariable para pacientes normales.....	140
<i>Figura IV.31.</i> Variación del croma C^* en función de su valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes normales.....	141
<i>Figura IV.32.</i> Variación del tono h^o en función de su valor inicial y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes normales.....	142
<i>Figura IV.33.</i> Variación de la luminosidad L^* en función de su valor inicial y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes normales.....	142
<i>Figura IV.34.</i> Variación del índice de blanqueamiento EW^* en función de su valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos.....	145
<i>Figura IV.35.</i> Variación del croma C^* en función del valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos.....	145
<i>Figura IV.36.</i> Variación del tono h^o en función del valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos.....	146
<i>Figura IV.37.</i> Variación de la luminosidad L^* en función de su valor inicial y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos.....	146
<i>Figura IV.38.</i> Funciones de pertenencia originales μ^1 y μ^2 para el ejemplo unidimensional.....	151
<i>Figura IV.39.</i> Funciones de pertenencia finales normalizadas utilizando el cálculo modificado $\mu^1(x)/\mu^1(x)+\mu^2(x)$ y $\mu^2(x)/\mu^1(x)+\mu^2(x)$	152
<i>Figura V.1.</i> Evolución de las magnitudes EW^* y C^* para cada tablilla de la guía Vita Bleachedguide 3D Master®.....	165

Índice de Tablas

<i>Tabla I.1.</i> Valores L^* a^* b^* registrados en incisivos centrales superiores <i>in vivo</i>	30
<i>Tabla IV.1.</i> Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB e índices de blanqueamiento EW^* y WIO^* para el sujeto EV.....	111
<i>Tabla IV.2.</i> Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB e índices de blanqueamiento EW^* y WIO^* para el sujeto RC.....	111
<i>Tabla IV.3.</i> Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L^* , a^* , b^* , C^* , h^o , EW^* y WIO^* medidos para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.....	115
<i>Tabla IV.4.</i> Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L^* , a^* , b^* , C^* , h^o , EW^* y WIO^* medidos para cada diente en el grupo de pacientes normales.....	116
<i>Tabla IV.5.</i> Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB e índices de blanqueamiento EW^* y WIO^* para el sujeto PG.....	121
<i>Tabla IV.6.</i> Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L^* , a^* , b^* , C^* , h^o , EW^* y WIO^* medidos para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	124
<i>Tabla IV.7.</i> Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L^* , a^* , b^* , C^* , h^o , EW^* y WIO^* medidos para cada diente en el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	125
<i>Tabla IV.8.</i> Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB de la guía Vitapan Classical®....	129
<i>Tabla IV.9.</i> Niveles y distribución de frecuencias de los factores exógenos para el grupo de pacientes normales.....	132
<i>Tabla IV.10.</i> Análisis ANOVA para Δa^* para pacientes normales.....	133
<i>Tabla IV.11.</i> Análisis ANOVA para Δb^* para pacientes normales.....	133
<i>Tabla IV.12.</i> Análisis ANOVA para ΔL^* para pacientes normales.....	134
<i>Tabla IV.13.</i> Análisis ANOVA para ΔEW^* para pacientes normales.....	134
<i>Tabla IV.14.</i> Niveles y distribución de frecuencias de los factores exógenos para el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	135
<i>Tabla IV.15.</i> Análisis ANOVA para Δa^* para pacientes tetraciclínicos.....	135
<i>Tabla IV.16.</i> Análisis ANOVA para Δb^* para pacientes tetraciclínicos.....	136
<i>Tabla IV.17.</i> Análisis ANOVA para ΔL^* para pacientes tetraciclínicos.....	136
<i>Tabla IV.18.</i> Análisis ANOVA para ΔEW^* para pacientes tetraciclínicos.....	137
<i>Tabla IV.19.</i> Modelos multivariantes para a^*_f , b^*_f , L^*_f y EW^*_f con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R^2) y error estándar, pacientes normales.....	138
<i>Tabla IV.20.</i> Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* , para pacientes normales.....	139
<i>Tabla IV.21.</i> Modelos univariantes para EW^*_f , C^*_f , h^o_f y L_f con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R^2) y error estándar, pacientes normales.....	139
<i>Tabla IV.22.</i> Modelos multivariantes para a^*_f , b^*_f , L^*_f y EW^*_f con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R^2) y error estándar, pacientes tetraciclínicos.....	143
<i>Tabla IV.23.</i> Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* , para	

pacientes tetraciclínicos.....	143
<i>Tabla IV.24.</i> Modelos univariados para EW^*_f , C^*_f , h^o_f y L_f , con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R^2) y error estándar, pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Tabla IV.25.</i> Consecuentes óptimos de las reglas.....	156
<i>Tabla V.1.</i> Valores de las magnitudes EW^* y C^* para cada tablilla de la guía Vita Bleachedguide 3D Master®.....	165
<i>Tabla V.2.</i> Valores promedios y desviación estándar de las diferencias de las coordenadas cromáticas y diferencias de color <i>CIELAB</i> y <i>CIEDE2000</i> para el grupo de pacientes normales.....	168
<i>Tabla V.3.</i> Valores promedios y desviación estándar de las diferencias de las coordenadas cromáticas y diferencias de color <i>CIELAB</i> y <i>CIEDE2000</i> para el grupo de pacientes tetraciclínicos.....	168
<i>Tabla V.4.</i> Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* , para los incisivos en el grupo de pacientes normales.....	172
<i>Tabla V.5.</i> Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* , para los caninos en el grupo de pacientes normales.....	172
<i>Tabla V.6.</i> Diferencias de color <i>CIELAB</i> entre los tonos VITA de la guía Vitapan Classical®.....	175
<i>Tabla V.7.</i> Tonos VITA post-blanqueamiento esperados para cada tono VITA pre-blanqueamiento.....	182

Índice de Ecuaciones

<i>Ecuación (I.1.)</i> Coordenadas cromáticas x , y y z (CIE1931).....	15
<i>Ecuación (I.2.)</i> Coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* (CIELAB).....	16
<i>Ecuación (I.3.)</i> Diferencia de color CIELAB (ΔE^*_{ab}).....	16
<i>Ecuación (I.4.)</i> Croma C^* (CIE $L^*C^*h^*$).....	17
<i>Ecuación (I.5.)</i> Ángulo de tono h° (CIE $L^*C^*h^*$).....	17
<i>Ecuación (I.6.)</i> Diferencia de color CIEDE2000 (ΔE^*_{00}).....	18
<i>Ecuación (I.7.)</i> Valores transformados L' , a' y b' (CIEDE2000).....	18
<i>Ecuación (I.8.)</i> Valores transformados C'_i y h'_i (CIEDE2000).....	19
<i>Ecuación (I.9.)</i> Diferencias en luminosidad, croma y tono para un par de muestras en CIEDE2000 ($\Delta L'$, $\Delta C'$ y $\Delta H'$).....	19
<i>Ecuación (I.10.)</i> Cálculo de la diferencia de color CIEDE2000 (ΔE^*_{00}).....	20
<i>Ecuación (I.11.)</i> Índice de blanqueamiento WIC	22
<i>Ecuación (I.12.)</i> Índice de blanqueamiento WIO	23
<i>Ecuación (III.1.)</i> Índice de blanqueamiento EW^*	88
<i>Ecuación (III.2.)</i> Índice de blanqueamiento EW^* pre-blanqueamiento (EW^*_i)	89
<i>Ecuación (III.3.)</i> Índice de blanqueamiento EW^* post-blanqueamiento (EW^*_f)	89
<i>Ecuación (III.4.)</i> Recta de regresión lineal.....	90
<i>Ecuación (III.5.)</i> Estimación mediante una recta de regresión lineal.....	91
<i>Ecuación (III.6.)</i> Error o residuo en regresión lineal.....	91
<i>Ecuación (III.7.)</i> Cálculo de los coeficientes a y b de la recta de regresión usando mínimos cuadrados... ..	91
<i>Ecuación (III.8.)</i> Recta de regresión univariable de mínimos cuadrados de y sobre x	91
<i>Ecuación (III.9.)</i> Estimación mediante una recta de regresión lineal multivariable.....	92
<i>Ecuación (III.10.)</i> Coeficiente de correlación (r).....	92
<i>Ecuación (III.11.)</i> Coeficiente de determinación (R^2).....	93
<i>Ecuación (III.12.)</i> Error estándar en la estimación (S_{y2}).....	93
<i>Ecuación (III.13.)</i> Estadístico F (ANOVA).....	95
<i>Ecuación (III.14.)</i> Función de pertenencia gaussiana ($\mu(x)$).....	98
<i>Ecuación (III.15.)</i> Ejemplo de función de pertenencia.....	98
<i>Ecuación (III.16.)</i> Valor de conclusión.....	101
<i>Ecuación (III.17.)</i> Ejemplo de valor B' de conclusión.....	101
<i>Ecuación (III.18.)</i> Valor B' de conclusión para sistemas con múltiples reglas.....	101

<i>Ecuación (III.19.)</i> Representación general de una regla difusa tipo TSK.....	102
<i>Ecuación (III.20.)</i> Valor de salida B' para un sistema de reglas difusas.....	102
<i>Ecuación (III.21.)</i> Cálculo del grado de activación de la regla k	103
<i>Ecuación (III.22.)</i> Salida numérica de un sistema difuso para un vector de entrada no difuso genérico ($\tilde{F}(\bar{x})$).....	103
<i>Ecuación (III.23.)</i> Función del error cuadrático medio (J).....	104
<i>Ecuación (III.24.)</i> Derivación para el cálculo óptimo de los consecuentes.....	105
<i>Ecuación (III.25.)</i> Sistema de ecuaciones resuelto mediante <i>Descomposición de Valores Singulares</i> (SVD).....	105
<i>Ecuación (IV.1.)</i> Modelo multivariable para a^*_f para pacientes normales.....	138
<i>Ecuación (IV.2.)</i> Modelo multivariable para b^*_f para pacientes normales.....	138
<i>Ecuación (IV.3.)</i> Modelo multivariable para L^*_f para pacientes normales.....	138
<i>Ecuación (IV.4.)</i> Modelo multivariable para EW^*_f para pacientes normales.....	138
<i>Ecuación (IV.5.)</i> Modelo univariable para EW^*_f para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.6.)</i> Modelo univariable para ΔEW^* para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.7.)</i> Modelo univariable para C^*_f para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.8.)</i> Modelo univariable para ΔC^* para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.9.)</i> Modelo univariable para h^o_f para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.10.)</i> Modelo univariable para Δh^o para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.11.)</i> Modelo univariable para L^*_f para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.12.)</i> Modelo univariable para ΔL^* para pacientes normales.....	139
<i>Ecuación (IV.13.)</i> Modelo multivariable para a^*_f para pacientes tetraciclínicos.....	143
<i>Ecuación (IV.14.)</i> Modelo multivariable para b^*_f para pacientes tetraciclínicos.....	143
<i>Ecuación (IV.15.)</i> Modelo multivariable para L^*_f para pacientes tetraciclínicos.....	143
<i>Ecuación (IV.16.)</i> Modelo multivariable para EW^*_f para pacientes tetraciclínicos.....	143
<i>Ecuación (IV.17.)</i> Modelo univariable para EW^*_f para pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Ecuación (IV.18.)</i> Modelo univariable para ΔEW^* para pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Ecuación (IV.19.)</i> Modelo univariable para C^*_f para pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Ecuación (IV.20.)</i> Modelo univariable para ΔC^* para pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Ecuación (IV.21.)</i> Modelo univariable para h^o_f para pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Ecuación (IV.22.)</i> Modelo univariable para Δh^o para pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Ecuación (IV.23.)</i> Modelo univariable para L^*_f para pacientes tetraciclínicos.....	144
<i>Ecuación (IV.24.)</i> Modelo univariable para ΔL^* para pacientes tetraciclínicos.....	144

<i>Ecuación (IV.25.)</i> Formato de las reglas para un tono VITA S , utilizando el <i>modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK)</i>	148
<i>Ecuación (IV.26.)</i> Formato para cada conjunto difuso en las coordenadas CIELAB L^* , a^* y b^* , para un tono genérico VITA S	149
<i>Ecuación (IV.27.)</i> Función de salida de un <i>modelo difuso TSK</i> ($\tilde{y}(\bar{x})$).....	149
<i>Ecuación (IV.28.)</i> Función de salida para un punto correspondiente al centro de una regla \bar{c}^k	150
<i>Ecuación (IV.29.)</i> Activación modificada de la primera regla en el ejemplo unidimensional con dos reglas.....	151
<i>Ecuación (IV.30.)</i> Activación modificada de la segunda regla en el ejemplo unidimensional con dos reglas.....	151
<i>Ecuación (IV.31.)</i> Formulación general de la activación modificada diseñada.....	152
<i>Ecuación (IV.32.)</i> Función de salida del <i>modelo difuso TSK</i> modificado.....	152
<i>Ecuación (IV.33.)</i> Derivación de las propiedades del modelo local extraídas del modelo modificado diseñado.....	153
<i>Ecuación (IV.34.)</i> Reglas obtenidas para los tonos de la guía Vitapan Classical®	154
<i>Ecuación (V.1.)</i> Error en diferencia de color.....	174

A lo largo de la historia, el ser humano se ha preocupado por lograr y obtener una apariencia física agradable. Esta preocupación por la estética en general y por la dental en particular, ha cobrado una gran importancia en la sociedad contemporánea. Nos hallamos inmersos en un creciente proceso de culto a la estética dental y, por este motivo, se incrementa día a día la demanda de tratamientos que, además de rehabilitar morfofuncionalmente al diente, le devuelven su aspecto natural o incluso lo mejoran (Amengual y Forner, 2007). De esto último, se encarga la Estética Dental, uno de los campos de mayor auge dentro de la Odontología.

La necesidad actual de tener sonrisas blancas, perfectas y, en definitiva, estéticamente agradables, ha motivado el desarrollo de técnicas cuya finalidad es el mejorar el aspecto de los dientes, incluyendo su color. Entre ellas caben destacar procedimientos clínicos como la ortodoncia fija o removible, las carillas de composite o porcelana, las coronas de porcelana y, como no, las diferentes técnicas de blanqueamiento dental.

Hoy en día, se puede considerar como procedimiento rutinario en las consultas dentales, la utilización de productos blanqueadores a base de peróxido de carbamida para el tratamiento de las discoloraciones dentales. Desde su introducción en 1989, son millones los pacientes que se han beneficiado de este tipo de técnicas, estando su práctica extendida en todo el mundo. El hecho de ser procedimientos con pocos efectos secundarios (todos ellos leves y transitorios) y su relativamente bajo coste, los han convertido en tratamientos muy populares.

Sin embargo, y a pesar de los años de experiencia, uno de los problemas que plantean es su falta de predictibilidad, es decir, *a priori*, hasta ahora, no se puede determinar cuál va a ser el resultado en un paciente dado. Esto implica que, el clínico, al proponer realizar un tratamiento blanqueador a un paciente no puede informarle adecuadamente sobre qué modificación cromática van a experimentar sus dientes, lo que, sin duda, constituye una limitación de la propia pauta terapéutica.

Por este motivo, nos planteamos realizar un estudio clínico que permita generar datos experimentales objetivos sobre el cambio cromático en dientes tras la aplicación de un agente blanqueador y a partir de los cuales, mediante un adecuado tratamiento estadístico, se pueda establecer alguna fórmula o algoritmo matemático que nos permita predecir objetivamente el resultado de un agente blanqueador en un paciente dado. Como aplicación novedosa, proponemos, además, una nueva vía de investigación basada en el empleo de la *lógica difusa* para el modelado del cambio cromático producido tras el proceso de blanqueamiento dental.

La presente Tesis Doctoral se estructura en 9 capítulos. En el capítulo I hacemos una breve introducción sobre conceptos básicos en Colorimetría, para posteriormente, desarrollar más ampliamente el tema del color en Odontología, desde las propiedades ópticas de los dientes, pasando por el espacio cromático dental, hasta los dispositivos que se usan actualmente para la medición del color en Odontología. Seguidamente, se incluye un epígrafe específico sobre Blanqueamiento Dental, donde se abordan temas relacionados con esta técnica clínica, su historia, sus indicaciones y contraindicaciones, las distintas modalidades actualmente disponibles, sus efectos adversos y su prevención. Al final de este

mismo capítulo, se describen brevemente los métodos más utilizados para la predicción de resultados en las distintas disciplinas de las Ciencias de la Salud.

En el capítulo II planteamos los objetivos de nuestro estudio.

En el capítulo III se describen, en primer lugar, la población de estudio, así como los criterios de inclusión y exclusión empleados para la selección de la misma. Se detalla también todo el material empleado en la fase clínica y de laboratorio del presente estudio, así como la metodología empleada para la recogida de los datos colorimétricos obtenidos tras el tratamiento blanqueador y su procesado. En este capítulo, profundizaremos más detalladamente en la metodología y aplicación de la *lógica difusa* para el modelado de los resultados colorimétricos obtenidos en nuestro trabajo de investigación.

En el capítulo IV se presentan, de forma esquematizada, los resultados obtenidos. En primer lugar, se exponen los *resultados colorimétricos* correspondientes a la población de estudio. A continuación, se analiza estadísticamente la *influencia de diferentes variables exógenas* en el proceso de blanqueamiento dental. Se incluyen también, los *modelos lineales* obtenidos para la predicción del cambio cromático dental en el espacio CIELAB. Y por último, se muestra el *sistema de inferencia difusa* diseñado para el modelado del cambio cromático producido tras dicho tratamiento dental.

En el capítulo V se analizan y discuten los resultados del capítulo anterior. Las conclusiones obtenidas a partir de la discusión se exponen en el capítulo VI.

Se añade un séptimo capítulo de anexos que recoge: la autorización para realizar el estudio clínico por parte del Comité de Ética de la Universidad de Granada (Anexo 1); la hoja de información para los pacientes donde se incluyen el protocolo seguido para realizar el estudio clínico y el consentimiento informado (Anexo 2); la ficha del paciente con su historia clínica y odontograma (Anexo 3); el cuestionario sobre hábitos dietéticos (Anexo 4); y un último apartado (Anexo 5), con las hojas de instrucciones y recomendaciones sobre el blanqueamiento ambulatorio para el paciente. Se adjunta también un CD anexo para facilitar la consulta de los

resultados colorimétricos obtenidos en CIELAB de los dientes correspondientes a la población de estudio.

El capítulo VIII agrupa las referencias bibliográficas utilizadas y citadas a lo largo de la Memoria.

Finalmente, el capítulo IX recoge el artículo científico aceptado y las comunicaciones presentadas en diferentes congresos, derivadas de la presente Tesis Doctoral.

Introducción

A lo largo de la historia de la Odontología, el principal objetivo de nuestra intervención clínica implicaba la correcta consecución de la funcionalidad del sistema oral, lo que a nivel dentario implica, básicamente, el mantenimiento de la forma y la función de los dientes. Actualmente nos hallamos ante un fuerte crecimiento en la demanda de tratamientos odontológicos estéticos, que no sólo incluyan la correcta rehabilitación morfo-funcional del diente, sino también la devolución de su aspecto natural. Y es aquí donde juega un papel importante el *color*, como parámetro clínico a considerar, y las diferentes técnicas de *blanqueamiento dental*, como herramienta clínica disponible para tal fin.

Se describen en este primer capítulo conceptos básicos relacionados con el *color* en general y la *Colorimetría*. A continuación, profundizaremos en diferentes aspectos relacionados con el *color en Odontología*, desde las propiedades ópticas de los dientes, el espacio cromático dental y la medición del color en Odontología. En el siguiente epígrafe, *Blanqueamiento Dental*, se abordan ampliamente temas relacionados con esta técnica clínica, incluyendo la patología y tratamiento de las discoloraciones dentales, la historia y concepto de blanqueamiento dental, indicaciones y contraindicaciones del mismo, los agentes blanqueadores y su mecanismo de acción, las diferentes técnicas de blanqueamiento vital y las limitaciones de este tipo de tratamientos. Finalmente, en el epígrafe *modelos predictivos en Biomedicina*, se describen los distintos paradigmas que se emplean frecuentemente para el análisis y modelado de datos, y la *predicción de resultados*.

I.1. Generalidades sobre el color

I.1.1. Concepto de color

Para entender a qué nos referimos cuando hablamos de *color* debemos definir antes el concepto de *luz*.

La *luz* es una forma de energía, concretamente la comprendida dentro del espectro de radiación electromagnética para el cual nuestros ojos son sensibles (entre los 360 y 780 nanómetros de longitud de onda). Las radiaciones situadas por debajo de este espectro no son visibles y se denominan *ultravioletas*, y las que se sitúan por encima tampoco lo son, y las llamamos *infrarrojas* (Pascual y cols., 2006).

Cuando hablamos de *color* hacemos referencia a la radiación que refleja un objeto cuando es iluminado por un haz de luz de una determinada longitud de onda, y cuyos rayos reflejados son percibidos de forma subjetiva por un observador como el color de dicho objeto (Amengual y cols., 2002). De manera que, cuando se observa un objeto iluminado por una luz blanca, el color que vemos corresponde a aquellas longitudes de onda que dicho objeto no ha absorbido o transmitido y que, por lo tanto, se han reflejado en su superficie hacia el exterior (Pascual y cols., 2006).

Esta respuesta psicofísica que llamamos *color* sería la correspondiente a la longitud de onda de la radiación lumínica que alcanza al ojo. Si ésta corresponde con la de un color del arco iris, veremos dicho color. Si contiene las longitudes de onda combinadas de dos colores percibimos un color nuevo compuesto por ambas, y cuando las contiene todas vemos el color resultante como blanco. El color negro sería la ausencia de radiación visible (Pascual y cols., 2006).

Gracias a Newton (1642-1727) sabemos que la luz blanca al descomponerse origina los siete colores del espectro visible: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, cian y violeta. La suma de todos los colores del espectro luminoso recompone la luz blanca (Burkinshaw, 2004) (figura I.1.).

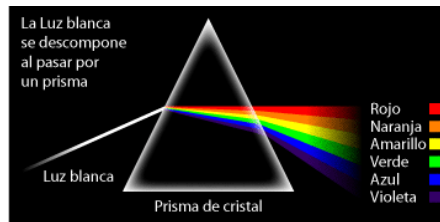


Figura I.1. Espectro de diferentes colores a través de un prisma de vidrio. La luz blanca resulta de la combinación de todo el espectro de luz.

De la serie de colores que componen el espectro visible podemos diferenciar tres *colores primarios* y otros, *secundarios* o *complementarios*, obtenidos de los primeros. Estos *colores primarios* constituyen el denominado *sistema RGB* y son: el rojo (*red*), verde (*green*) y azul (*blue*). Los *colores secundarios* se obtienen sumando los primarios, de forma que el amarillo, por ejemplo, es la suma de verde y rojo. Los tres *colores primarios* juntos dan el color blanco, mientras que la mezcla de los *secundarios* produce el color negro. Ésta es la *teoría aditiva del color*. La *teoría sustractiva*, en cambio, está basada en restar luz eliminando longitudes de onda determinadas del espectro incidente mediante filtros o bien mediante absorción y dispersión de la luz (Amengual y cols., 2002).

De acuerdo con la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), el color percibido se define como el aspecto de la percepción visual mediante el cual un observador puede distinguir entre dos campos del mismo tamaño, forma y textura basándose en las diferencias en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación (Westland, 2003).

I.1.2. Percepción del color

La percepción del color es una respuesta fisiológica a un estímulo físico (Van Noort, 2002). Cada persona puede percibir el color en una forma distinta y basada en experiencias anteriores. Además, la fatiga visual, la edad, el tipo de luz, el ambiente que nos rodea, el ángulo de observación y otros factores, como por ejemplo el sexo, pueden influir en la percepción del mismo (Burkinshaw, 2004).

Para que se produzca la percepción del color, son necesarios tres elementos que participan directamente en este proceso y que son: el *receptor* u *observador*, la *fuentes de luz* y el *objeto observado* (Joiner, 2004). Estas tres variables, que se describen a continuación, están íntimamente relacionadas de forma que se puede tener luz y un objeto que recoja ésta, pero si no hay observador no habrá percepción; de la misma forma que puede haber luz y un observador, pero si no hay objeto no habrá percepción cromática.

I.1.2.1. El ojo humano como receptor del color

Nuestros ojos constan de unas células receptoras del color que son los llamados *conos* y *bastones*. La función de los primeros consiste en dar color a la visión en niveles normales de iluminación (visión diurna) y perciben los colores primarios; la función de los bastones es la de dar visión monocromática en niveles bajos de iluminación (visión nocturna) y perciben luminosidad (*valor*, *value*). Estos fotorreceptores, localizados en la retina, recogen parte del espectro visible y lo transforman en impulsos eléctricos, que son enviados al cerebro, donde dicha información es procesada y, junto con los recuerdos de experiencias cromáticas anteriores, constituyen nuestra percepción del color (Paravina y Powers, 2004).

La percepción del color por el sistema visual resulta de la existencia de los *conos*. Existen tres tipos, que se diferencian según la longitud de onda para la que son sensibles dentro del espectro de luz visible. Así tenemos que los *conos S* tienen un pico de sensibilidad que aparece a los 420 nm, 530 nm para los *conos M*, y 560 nm para los *conos L* (Westland, 2003; Paravina y Powers, 2004). Un 65% de estos fotorreceptores son sensibles al color rojo, un 33% al verde y aproximadamente un 2% al azul. Esto último explica que la sensibilidad cromática del ojo humano esté basada en el *sistema rojo-verde-azul (Sistema RGB)* (Belvedere, 2005). Nuestro ojos constan de más células especializadas en trabajar con las longitudes de onda correspondientes al rojo que a ningún otro color, por lo que cuando el entorno en que nos encontramos nos envía demasiado rojo se produce una saturación de información en el cerebro de este color, originando una sensación de irritación en las personas.

I.1.2.2. La fuente de luz

Gracias a la presencia de luz percibimos no sólo los objetos sino también su cromaticidad. De las diferentes intensidades lumínicas que inciden sobre el objeto resultan las variaciones en la percepción de un mismo color. Así pues, existen diferencias, por ejemplo, entre la luz solar o natural y la luz artificial. Como ya apuntó Leonardo Da Vinci (1452-1519), dentro de la luz natural, las diferentes posiciones del Sol a lo largo del día hacen que la incidencia de luz provoque variaciones en el color del objeto. Por tanto, la fuente de luz ejerce una influencia cualitativa y cuantitativa en la percepción cromática.

Con respecto a esta segunda variable, cuando la luz incide sobre un objeto, pueden ocurrir diferentes posibilidades de interacción. Puede ser que la luz se refleje, refracte, absorba, disperse y/o se transmita.

La *reflectancia espectral* de un cuerpo está determinada por las propiedades de *absorción* y *scattering* del material, y normalmente es responsable del color del objeto (Paravina y Powers, 2004). Esta medida se representa gráficamente y proporciona un medio de cuantificación numérica del color. Como los objetos varían de color, estas gráficas representan la energía que ha sido absorbida o reflejada (Joiner, 2004).

Dentro de este apartado, es importante hacer referencia a las diferencias entre los conceptos de “*fuentes de luz*” e “*iluminante*”. “*Fuentes de luz*” es un concepto genérico para la fuente de emisión de radiación electromagnética visible. Un “*iluminante*” es la especificación de una fuente de luz concreta. Es una construcción matemática que no puede realizarse físicamente en forma de fuente de luz.

Dado que la calidad de la fuente de luz incidente influye en la percepción del color de un objeto dado, en 1964 la CIE recomendó el uso de una serie de *iluminantes* en todos aquellos procesos que exijan una correcta percepción/medida cromática. Entre ellas, las denominadas *fuentes de luz “día”*, que son fuentes fluorescentes de luz corregidas, que ofrecen temperaturas de color de 5000 °K a 6500 °K, y que se conocen comúnmente como *luz día D50* y *D65* respectivamente (Pascual y cols., 2006). Este concepto de *temperatura de color* se define como la

relación entre la temperatura de un cuerpo (cantidad de energía que emite) y el color que percibimos. De tal manera que, cuanto más alta es la temperatura del objeto, tanto más amplio se hace el espectro de radiación que emite y, por tanto, se modifica el color que percibimos. Asimismo, también hay que tener en cuenta que diferentes temperaturas de color de la luz dentro de un mismo ambiente pueden variar la percepción del objeto a examinar.

La percepción del color por el ojo humano varía según las condiciones de iluminación. La intensidad de iluminación necesaria para que el ojo humano perciba cómodamente el color depende de la temperatura cromática de la luz. La luz perfectamente neutra da una temperatura de color de 6500 °K. Por ello, hoy se admite que 6500 °K es la temperatura cromática real de la luz blanca percibida por el ojo humano como blanca, y es la que debería usarse como fuente de luz (CIE D65) para igualar colores, por ejemplo, en Odontología (Belvedere, 2005). En la actualidad se comercializa la lámpara Shade Light[®] de la casa Kerr, que ofrece una luz D65 (Pascual y cols., 2006) y de la que hablaremos más detalladamente en el capítulo de los materiales empleados en este trabajo.

I.1.2.3. El objeto de observación

El color de los objetos se caracteriza, desde un punto de vista físico, por la *reflectancia espectral difusa*, que nos indica qué fracción de luz de una determinada longitud de onda es reflejada por el cuerpo. La parte de luz que no se refleja puede absorberse, transmitirse o dispersarse. Por ejemplo: si se ilumina con luz blanca un cuerpo y éste aparece rojo, quiere decir que ha absorbido, al menos, una parte notable de las luces espectrales distintas del rojo que constituyen la fuente que lo ilumina y ha reflejado el resto de las luces, lo que produciría la sensación de rojo (Hita, 2001). El color de los objetos también depende de las propiedades intrínsecas del propio objeto. Características como la translucidez, la opacidad y el brillo, entre otras, así como la forma y el tamaño del objeto, influyen en la percepción del color.

En nuestro caso, nos referiremos al diente como el objeto de observación y será descrito más adelante en el epígrafe del color dental.

I.1.3. Espacios de representación del color

A lo largo de la historia, diversos investigadores han intentado ordenar el color de varias maneras, ya sea de forma bidimensional o tridimensional, tomando en cuenta distintas variables. El objetivo de la *Colorimetría* es introducir un método de medida del color que permita asignar una magnitud medible a cada uno de los atributos perceptivos y, además, determinar el color mediante números que permitan su especificación en un *espacio de representación* (Corbalán y cols., 1996).

Un *sistema de ordenación del color* o *espacio cromático* es un medio sistemático para organizar los colores en un espacio tridimensional. Este tipo de sistemas ha sido ampliamente usado para especificarlos, tanto en la enseñanza de los colores como en la industria. En conjunto, todos estos sistemas están basados en los principios de percepción del color (Paravina y Powers, 2004). Los más conocidos y empleados son:

I.1.3.1. Sistema de ordenación cromática de Munsell

Fue creado en 1905 por Albert H. Munsell. Es el sistema más antiguo y define los tres atributos del color llamados *dimensiones del color* (figura I.2.), que son el *tono*, *valor* y *croma* (Paravina y Powers, 2004).

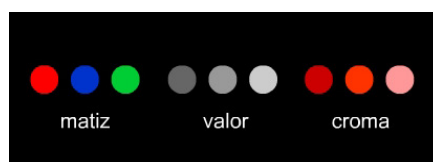


Figura I.2. Dimensiones del color.

El *matiz* o *tono* (*hue*) es el atributo de un color que permite distinguir entre las diferentes familias de color, por ejemplo, rojos, verdes y azules (Joiner, 2004). Este parámetro está directamente relacionado con la longitud de onda de la radiación lumínica (Pascual y cols., 2006). El *valor* (*value*) indica la luminosidad de un color (Joiner, 2004) y se corresponde con las tonalidades de gris comprendidas entre un valor de 0 (para tonos negros) a 10 (tonos blancos) (Pascual y cols., 2006). El

chroma (*chroma*) es el grado de saturación y describe la intensidad o viveza de un color (Joiner, 2004).

I.1.3.2. Espacio cromático CIE1931 (x, y, Y)

En 1931, la CIE creó el *Sistema* x, y, Y para la representación del color, siendo X , Y y Z los valores triestímulo basados en la respuesta del ojo humano promedio a diferentes longitudes de onda (Paravina y Powers, 2004).

Dada la validez de la generalización tricromática, resulta adecuado representar el color mediante vectores en un espacio tridimensional llamado *espacio triestímulo*. Supongamos un color Q , y un conjunto de colores primarios R , G y B . El color Q podrá obtenerse con la mezcla de los tres primarios en la forma:

$$Q = R_Q \cdot R + G_Q \cdot G + B_Q \cdot B$$

donde los valores R_Q , G_Q y B_Q representan las “cantidades” de cada primario que deben ser mezcladas para obtener el color Q , y se llaman *valores triestímulo* de Q .

En 1931 la CIE estableció las funciones de mezcla correspondientes a un observador estándar, denominadas $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$ y $Z(\lambda)$.

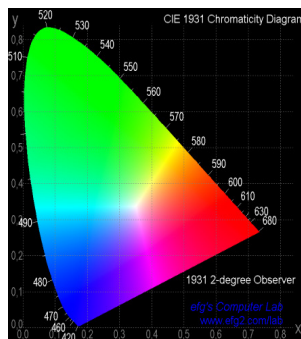


Figura I.3. Diagrama cromático del espacio CIE1931.

En este nuevo sistema, los valores triestímulo del color Q serían X , Y y Z . Las coordenadas cromáticas de cada estímulo son x , y y z , obtenidas a partir de los valores triestímulo como:

$$x = X / X+Y+Z \quad y = Y / X+Y+Z \quad z = Z / X+Y+Z \quad (I.1.)$$

de modo que $x+y+z= 1$.

I.1.3.3. Espacio cromático CIE1976 (CIELAB)

Derivado del espacio CIE1931, en 1976 la CIE definió un nuevo espacio cromático, CIELAB, que sostiene la teoría aceptada de la percepción del color basada en los tres receptores del color (rojo, azul y verde) existentes en el ojo. Este sistema, que actualmente es uno de los más utilizados, representa un espacio cromático tridimensional, donde los ejes están representados por las coordenadas L^* , a^* y b^* (figura I.4.). Este espacio cuenta con un eje vertical que expresa la coordenada L^* y dos ejes horizontales que reflejan las coordenadas a^* y b^* . El valor L^* es la medida de la luminosidad de un objeto y está cuantificada en una escala que va de 0 (negro) a 100 (blanco). El valor a^* es la medida del rojo (cuando a^* es positivo) o verde (cuando a^* es negativo). Y el valor b^* es la medida del amarillo (cuando b^* es positivo) o azul (cuando b^* es negativo). Estas dos últimas coordenadas, a^* y b^* , se aproximan a un valor de 0 para los colores neutros (blanco, grises) y aumentan en magnitud para los colores más intensos o saturados (Joiner, 2004).

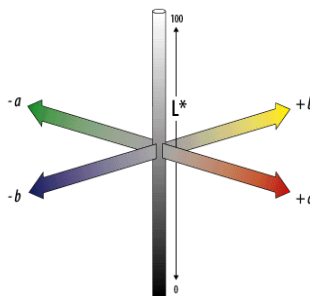


Figura I.4. Sistema CIELAB.

Si se observa la figura anterior, a lo largo del eje vertical (eje “neutro”), entre negro ($L=0$) y blanco ($L=100$) se encuentra una zona continua de tonalidades grises.

Las ecuaciones que definen CIELAB en función de los valores triestímulo son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 && \text{para } (Y/Y_0) > 0.008856 \\
 L^* &= 903.3 (Y/Y_0) && \text{para } (Y/Y_0) \leq 0.008856 \\
 a^* &= 500 [f(X/X_0) - f(Y/Y_0)] && \text{(I.2.)} \\
 b^* &= 200 [f(Y/Y_0) - f(Z/Z_0)]
 \end{aligned}$$

donde la función $f(\alpha)$ es de la forma:

$$\begin{aligned}
 f(\alpha) &= (\alpha)^{1/3} && \text{cuando } (\alpha) > 0.008856 \\
 f(\alpha) &= 7.787 (\alpha) + (16/116) && \text{cuando } (\alpha) \leq 0.008856
 \end{aligned}$$

Su diferencia de color asociada, ΔE^*_{ab} , viene dada por la distancia euclídea entre dos puntos en el espacio tridimensional, y cuya expresión es:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{(I.3.)}$$

donde ΔL^* , Δa^* , Δb^* indica la diferencia en cada una de las coordenadas:

$$\begin{aligned}
 \Delta L^* &= L^*_2 - L^*_1 \\
 \Delta a^* &= a^*_2 - a^*_1 \\
 \Delta b^* &= b^*_2 - b^*_1
 \end{aligned}$$

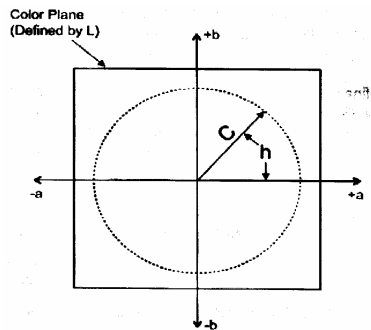
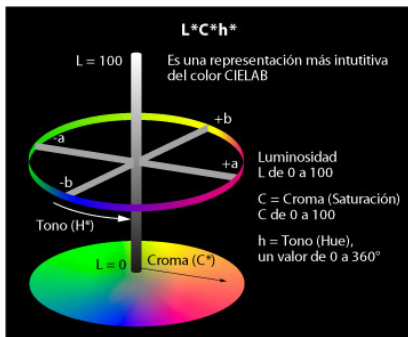
El espacio cromático CIELAB proporciona una representación tridimensional de la percepción del color. Cuando dos puntos que representan dos mediciones están superpuestos en el espacio, el valor de la diferencia de color es cero. Si la distancia entre dos puntos (L^*_1, a^*_1, b^*_1 y L^*_2, a^*_2, b^*_2) en el espacio cromático aumenta, parece lógico suponer que aumenta, en consecuencia, la diferencia de color percibida entre los estímulos que desencadenan estos dos puntos.

Como se comentó anteriormente, los atributos cromáticos derivados de las coordenadas a^* , b^* y L^* están correlacionados con la percepción del color: el valor L^* corresponde a la claridad de un estímulo, y de las coordenadas a^* y b^* se obtiene los valores del croma C^* y del ángulo de tono h° , creando el sistema CIE $L^*C^*h^*$:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \tag{I.4.}$$

$$h^\circ = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \tag{I.5.}$$

Este sistema es una representación en coordenadas cilíndricas del espacio cromático CIELAB (figura I.5.). En cada plano cromático horizontal del espacio CIELAB, C^* (o *croma*) se mide como la distancia con respecto al eje vertical (neutro o gris), y h° (*tonalidad cromática*) es el ángulo de desplazamiento medido desde el eje rojo/verde (figura I.6.). Esto es, el croma C^* nos indica si en el diagrama CIELAB un estímulo está más o menos cerca del estímulo acromático situado en el centro (0,0) del diagrama. Y el ángulo de tono h° , que varía desde 0° hasta 360° , nos indica la zona del diagrama en la que se encuentra el estímulo, es decir, el tono del mismo. Los ángulos de 0° a 90° se corresponden con los colores rojos, naranjas y amarillos; los ángulos de 90° a 180° son colores amarillos, amarillos verdosos y verdes; los ángulos de 180° a 270° son colores verdes, verdes azulados (cian) y azules, y los ángulos de 270° a 360° son colores azules, lilas y magenta, que pasan de nuevo a rojo al alcanzar los 360° .



Figuras I.5. y I.6. Espacio cromático CIE $L^*C^*h^*$ y representación del croma C^* y el ángulo de tono h° , respectivamente.

En la actualidad, el uso de CIELAB está ampliamente difundido y su empleo es mayoritario en la práctica industrial. Además, en base a CIELAB se han desarrollado muchas de las fórmulas de diferencia de color que actualmente se emplean, en particular la fórmula CIE94 (CIE, 2001) y la fórmula CIEDE2000 (CIE, 2004; Luo y cols., 2001). En cualquier caso el uso de estas nuevas fórmulas, no reemplaza aún, según la CIE, el empleo de CIELAB como sistema de especificación del color.

La fórmula de diferencia de color CIEDE2000 (CIE, 1995; CIE, 2001; Luo y cols., 2001) viene dada por la expresión:

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right) \right]^{1/2} \quad (1.6)$$

donde $\Delta L'$, $\Delta C'$ y $\Delta H'$ son las diferencias en luminosidad, croma y tono para un par de muestras en CIEDE2000, y R_T es una función, llamada *término de rotación* que da cuenta de la interacción entre las diferencias en croma y tono en la región de los azules.

Además de los términos antes mencionados, en la fórmula se incluye una modificación del eje a^* de CIELAB, con el fin de lograr un mejor acuerdo con las diferencias de color percibidas para los colores de bajo croma, colores neutros. La modificación incrementa la magnitud de valores a' comparados con los valores de a^* para dichos colores. Cabe hacer notar que esta transformación de a^* en a' , no supone una redefinición de CIELAB, sólo tiene efectos en cuanto al cálculo posterior de la diferencia de color.

La transformación es como sigue:

$$\begin{aligned} L' &= L^* \\ a' &= a^* (1 + G) \\ b' &= b^* \end{aligned} \quad (1.7)$$

Los valores transformados L' , a' y b' se usan en el cálculo del ángulo de tono, croma y las diferencias en luminosidad, croma y tono, y estas cantidades se designan con una prima. Su cálculo se realiza de acuerdo a las siguientes expresiones:

1. Cálculo de C'_i y h'_i :

$$\begin{aligned}
 C_{i,ab}^* &= \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2} \quad i=1,2 \\
 \bar{C}_{ab}^* &= \frac{C_{1,ab}^* + C_{2,ab}^*}{2} \\
 G &= 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + (25)^7}} \right) \\
 a'_i &= (1+G)a_i^* \quad i=1,2 \\
 C'_i &= \sqrt{(a'_i)^2 + (b'_i)^2} \\
 h'_i &= \begin{cases} 0 \\ \tan^{-1}(b_i/a_i) \end{cases} \quad i=1,2
 \end{aligned} \tag{I.8.}$$

2. Cálculo: $\Delta L'$, $\Delta C'$, $\Delta H'$:

$$\begin{aligned}
 \Delta L' &= L'_2 - L'_1 \\
 \Delta C' &= C'_2 - C'_1 \\
 \Delta h' &= \begin{cases} 0 & C'_1 C'_2 = 0 \\ h'_2 - h'_1 & C'_1 C'_2 \neq 0, |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) - 360 & C'_1 C'_2 \neq 0, (h'_2 - h'_1) > 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) + 360 & C'_1 C'_2 \neq 0, (h'_2 - h'_1) < -180^\circ \end{cases} \\
 \Delta H' &= 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{I.9.}$$

3. Cálculo de la diferencia de color CIEDE2000 (ΔE^*_{00}):

$$\begin{aligned} \bar{L}' &= (L_1^* + L_2^*)/2 \\ \bar{C}' &= (C_1' + C_2')/2 \\ \bar{h}' &= \begin{cases} \frac{h_1' + h_2'}{2} & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ; \quad C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h_1' + h_2' + 360^\circ}{2} & |h_1' - h_2'| > 180^\circ; \quad (h_1' + h_2') < 360^\circ \quad C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h_1' + h_2' - 360^\circ}{2} & |h_1' - h_2'| > 180^\circ; \quad (h_1' + h_2') \geq 360^\circ \quad C_1' C_2' \neq 0 \\ (h_1' + h_2') & C_1' C_2' = 0 \end{cases} \\ T &= 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ) \\ \Delta\theta &= 30 \exp \left\{ - \left[\frac{\bar{h}' - 2.75^\circ}{25} \right]^2 \right\} \\ R_c &= 2 \sqrt{\frac{C'^7}{C'^7 + 25^7}} \\ S_L &= 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \\ S_c &= 1 + 0.045\bar{C}' \\ S_H &= 1 + 0.015\bar{C}'T \\ R_T &= -\sin(2\Delta\theta)R_c \end{aligned} \tag{I.10.}$$

I.1.4. Umbrales de discriminación cromática

Bajo un punto de vista tanto científico como técnico, a veces ofrece más interés la evaluación de diferencias entre colores, o del color de un estímulo respecto a un color patrón, que la medida en sí de un color. Se plantea pues una doble necesidad: cuantificar estas diferencias y hacerlas reproducibles en un sistema de representación, lo que es tanto como conocer la métrica del espacio de color o el elemento de línea asociado a ella (Pérez, 1994).

Tradicionalmente se han abordado estos problemas de la medida experimental de diferencias de color, entendiéndolas como “*mínimas diferencias perceptibles*” o “*umbrales diferenciales de color*”, para una posterior generalización al elemento de línea que satisfaga la predicción de dichos resultados experimentales. En este sentido y, si bien, a veces ha surgido la polémica aún no

resuelta sobre si hay diferencias entre los criterios de *perceptibilidad* y *aceptabilidad de diferencias de color*, la mayoría de los estudios en los que se basa la Colorimetría Diferencial, optan por criterios de evaluación de *diferencias perceptibles*. No obstante, en determinadas aplicaciones industriales sí se emplean, a veces, criterios de *aceptabilidad* en los procesos de control colorimétrico. Podemos decir, que el estudio de diferencias de color es más bien un problema científico, mientras que el establecimiento de tolerancias es una cuestión derivada de tipo técnico ligada a las necesidades industriales (Pérez, 1994).

En el campo de la Colorimetría Diferencial existen numerosos trabajos sobre la estimación de *umbrales de discriminación cromática*, tanto de *aceptabilidad* como *perceptibilidad* (Wyszecki, 1972). No obstante, la mayoría de ellos muestran la falta de uniformidad de los sistemas de representación del color como podemos observar en la figura I.7., correspondiente a las clásicas *elipses de MacAdam* en el espacio CIE1931.

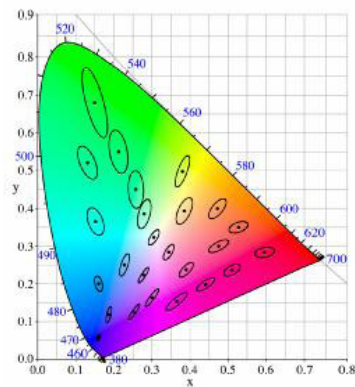


Figura I.7. Elipses de discriminación de MacAdam.

Se observa que dichas elipses son diferentes en tamaño, orientación y forma a lo largo del diagrama cromático, siendo más pequeñas en la zona de los azules, intermedias en la de los rojos, y más grandes en la zona de los verdes.

Si tomamos la distancia desde el centro a cada punto de la elipse como la unidad de diferencia de color, un espacio cromático uniforme sería aquel en el que al representar dichas diferencias los resultados sean circunferencias de igual radio, es decir, que exista una correlación entre la diferencia de color y la medida de la

distancia. En la figura I.7. comprobamos que esa distancia no es la misma ni a lo largo de cada elipse ni de una elipse a otra. Por lo tanto, se deduce que el espacio CIE1931 no es un espacio uniforme, lo que ha llevado a la búsqueda de espacios de representación de color uniforme y a pesar de que no se ha conseguido, sí que se ha llegado a otros espacios muchos más homogéneos como CIELAB, empleado en nuestra Memoria.

I.1.5. Índices de blanqueamiento

La *blancura* es una propiedad importante en la industria del color. A lo largo de los años, se han desarrollado varios *índices de blanqueamiento* con el objetivo de simplificar la blancura de los objetos de una forma simple y numérica.

La CIE recomienda que se use el *índice de blanqueamiento WIC* (CIE, 2004; Luo y cols., 2005), cuya expresión es la siguiente:

$$WIC = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y) \quad (\text{I.11.})$$

donde Y es el valor del triestímulo de la muestra, x e y son las coordenadas cromáticas de la muestra, y x_n e y_n se refieren a las cromaticidades del iluminante (como ya hemos visto anteriormente, para comparaciones entre muestras se recomienda el iluminante estándar D65). Cuanto mayor es el resultado de la fórmula de WIC, mayor es la blancura de la muestra (CIE, 2004).

Algunos investigadores proponen los cambios en el amarilleamiento como el factor más importante para la evaluación del diente blanqueado (Gerlach y cols., 2000; Joiner, 2004; Luo y cols., 2007; Joiner y cols., 2008a). Aunque se ha demostrado que los índices de blanqueamiento pueden aplicarse para la predicción de la blancura del diente, todavía no está clara la aplicabilidad de tales fórmulas ya que muchos de estos índices se designaron para ser usados sólo con muestras cuyas coordenadas cromáticas están dentro de un rango estrecho y el color dental parece estar fuera de este rango (Luo y cols., 2005).

Recientemente, Luo y cols. (Luo y cols., 2005) propusieron una versión modificada del índice WIC, conocida como *índice de blanqueamiento WIO*, basado directamente en observaciones de la guía de color Vitapan 3D Master[®] de Vita, y que viene definida como:

$$WIO = Y + 1075.012(x_n - x) + 145.516(y_n - y) \quad (\text{I.12.})$$

Este índice es formalmente similar al índice WIC aunque los parámetros han sido optimizados expresamente para la evaluación de la blancura de los dientes. Recientemente, se ha demostrado que es el índice más apropiado para predecir y evaluar los cambios en la blancura de los dientes (Luo y cols., 2005; Luo y cols., 2007). Sin embargo, este índice se define a partir de las coordenadas cromáticas del espacio CIE1931, un espacio de menor repercusión y empleo en el campo de la Odontología que el espacio CIELAB. Por ello, deberían definirse nuevos índices de blanqueamiento basados en este último espacio cromático. A este respecto, en la presente Memoria, y como veremos el Capítulo III, definimos un nuevo índice obtenido a partir de la coordenadas cromáticas en este espacio.

I.2. Color en Odontología

El tercer elemento que influye en la apreciación del color es el objeto observado que, en este caso, es el *diente*.

La percepción del color de los dientes es el resultado de una respuesta fisiológica a estímulos físicos, la luz. Un haz de luz puede absorberse, reflejarse o transmitirse a través del diente por medio de un conjunto complejo de fenómenos ópticos de interacción. La apariencia de los dientes se ve afectada por la interacción de sus propiedades ópticas y la distribución espacial de la luz, el observador y el diente. Factores tales como el grado de hidratación superficial de los dientes, el estado de los tejidos blandos circundantes y las restauraciones dentales adyacentes, pueden influir en el color de los mismos (Paravina y Powers, 2004).

Por tanto, para entender el *color dental* es fundamental conocer las propiedades ópticas de los tejidos dentales.

I.2.1. Propiedades ópticas de los dientes

El diente está constituido por tres tejidos, el esmalte, la dentina y la pulpa, y su color natural depende del grosor, composición y estructura de estos tejidos que, en definitiva, son los responsables de su complejidad desde el punto de vista óptico (figura I.8.). Los tres parámetros a los que hemos hecho alusión, evolucionan considerablemente a lo largo de la vida, influyendo en el color del diente. Cada uno de estos tejidos presenta propiedades ópticas distintas (Touati y cols., 2000).

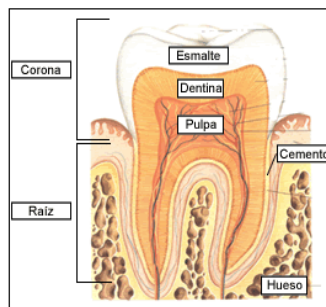


Figura I.8. Estructura esquemática de un molar.

I.2.1.1. Pulpa dental: la pulpa está constituida por un 25% de materia orgánica y un 75% de agua. La materia orgánica está compuesta por células, fibras y sustancia fundamental. Se trata, por tanto, de un tejido conectivo laxo, bien irrigado e innervado, que se encuentra encerrado en el interior de la cámara pulpar y de los conductos radiculares, lo que condiciona que su volumen vaya disminuyendo con el paso de los años por la continua formación de dentina (Llamas y Villa, 2001). Tiene un color rojizo oscuro. Su tamaño es mayor en dientes jóvenes, lo que tiene influencia en el color, ya que da lugar a una tonalidad rosada, a menudo más visible en las superficies linguales. El estrechamiento progresivo que se produce con los años hace que su influencia sobre el cromatismo dentario disminuya con la edad.

I.2.1.2. Dentina: es el tejido más importante desde el punto de vista cromático. Es la responsable de la tonalidad y el cromatismo dentario. Rodea la

cavidad pulpar y, en circunstancias normales, está cubierta por el esmalte o cemento. En su composición encontramos minerales (hidroxiapatita en un 70%), material orgánico (20%) y agua (10%). El bajo contenido mineral, comparado con el del esmalte, y la elevada proporción de materia orgánica, explica la opacidad relativa de la dentina primaria (formada antes de la erupción del diente). Está atravesada por un gran número de cavidades estrechas y largas, los túbulos dentinarios, que producen una difracción selectiva de la luz, según la cual, ciertos rayos serán reflejados y otros absorbidos. Este efecto es el responsable de la opacidad de la dentina primaria.

Las distintas estructuras microanatómicas, la arquitectura tubular, combinada con la anatomía macroscópica de la dentina, resultan en áreas con diferencias en el índice de reflectancia, dando un reflejo y dispersión no homogéneo de la luz (figura 1.9.). Esto da lugar a áreas de opacidad densa y de saturación de color elevada, confiriendo a la dentina un aspecto policromático. Con la edad la dentina primaria evoluciona y se forman otros tipos de dentina, con estructura y propiedades ópticas diferentes que influyen en la cromacidad dentaria (Touati y cols., 2000). Los pigmentos orgánicos presentes en la microestructura de la dentina son responsables de la *fluorescencia* de este tejido, es decir, de su capacidad de absorber en el rango ultravioleta y emitir en visible, una luz fluorescente policromática con una longitud de onda aproximada entre 400-410nm. Este fenómeno se evidencia en algunas situaciones, como por ejemplo, cuando los dientes naturales son vistos bajo la luz ultravioleta de la iluminación de las discotecas.

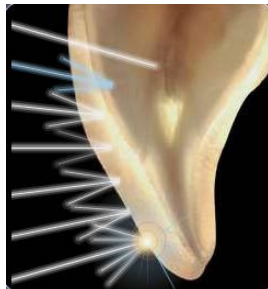


Figura 1.9. Interacción de luz en un diente.

I.2.1.3. Esmalte: es el tejido más duro y mineralizado del organismo. Está constituido por un 95% de minerales y un 5% de agua y materia orgánica. El alto contenido mineral y la naturaleza y disposición de los prismas que lo constituyen, hacen que el esmalte sea duro, brillante, translúcido, prácticamente acromático y radio-denso. La apariencia óptica del esmalte dental depende de su composición, estructura, grosor y textura superficial, parámetros que varían de una zona dentaria a otra y que evolucionan a lo largo de la vida. En un diente joven, el esmalte tiene menos contenido mineral y es muy grueso, creando el efecto óptico de una leve translucidez y alta luminosidad; en el diente anciano, el esmalte es más rico en minerales y más delgado por el desgaste natural, lo que se traduce en una mayor translucidez (incluso transparencia), que permitirá que, a su través, se haga patente el color de la dentina.

El esmalte se caracteriza porque su coeficiente de transmisión depende de la longitud de onda incidente, es decir, la transmisión de luz por el esmalte aumenta conforme aumenta la longitud de onda; es más translúcido para altas longitudes de onda. Por este motivo, el esmalte es el responsable de la *opalescencia dentaria*.

El esmalte es básicamente translúcido por su composición, pero su translucidez no es uniforme sino que muestra un gradiente de opacidad, de manera que la mitad más externa es más translúcida que la interna al ser los prismas del esmalte más densos en esta región. Este gradiente de opacidad en el esmalte se puede reproducir en las restauraciones considerando el esmalte como dividido en dos zonas de translucidez: una zona translúcida y una semi-translúcida. Estas capas permiten que la luz penetre a través de la estructura dental y se refleje sobre la capa de dentina, que es básicamente opaca y que es la responsable del color del diente. El esmalte es más radiopaco que la dentina (Touati y cols., 2000).

Por lo anteriormente descrito se puede afirmar que el diente natural es un auténtico mosaico de color, en el rango de los blancos amarillentos, y el resultado de los efectos combinados del esmalte y la dentina, fundamentalmente. Por lo tanto, es esencial comprender la influencia que ejerce cada componente sobre las propiedades básicas del otro. La dentina, responsable del tono y croma dentarios, reduce el valor del esmalte. Si el esmalte es muy delgado y la dentina es muy saturada, como sucede en la zona del cuello del diente, entonces la cromaticidad de

la dentina domina la percepción cromática del diente. Si avanzamos en dirección incisal, a nivel del tercio medio, el esmalte es más grueso por lo que aumenta el valor y disminuye la cromacidad. Finalmente en el tercio incisal, sólo hay esmalte, lo que condiciona las cualidades ópticas únicas de esta zona. A este nivel, el diente se vuelve translúcido, prácticamente acromático, y presenta opalescencia, es decir, refleja las longitudes de onda más cortas (aspecto azulado con luz reflejada) y transmite las largas (aspecto anaranjado con luz transmitida) (Joiner, 2004).

I.2.2. Espacio cromático dental

Recientemente, para su mejor comprensión por parte de los clínicos, la zona del espacio cromático correspondiente a los dientes naturales ha sido descrita como un sub-espacio cromático con forma de plátano en los sistemas CIELAB y CIE L*a*b*. Este *espacio cromático dental* está situado entre el rojo claro y el amarillo claro; tiene forma alargada y se extiende paralelamente al eje de luminosidad. Los valores extremos de este sub-espacio cromático, es decir, los del diente más claro existente en la naturaleza y los del diente más oscuro, son, en el sistema CIELAB los valores de 78/1/12 y 62/6/31, respectivamente (figura I.10.). En el sistema CIE L*a*b* estos valores son de 78/12/86 y 62/32/78, respectivamente.

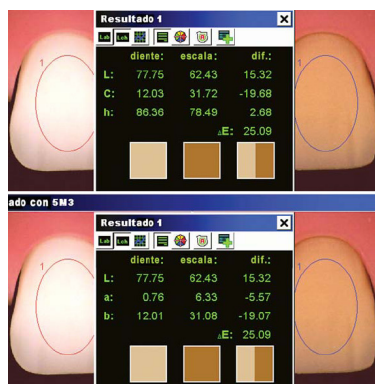


Figura I.10. Valores L*a*b* y CIELAB del diente natural más claro en comparación con el diente natural más oscuro.

Para una mejor visualización de los valores extremos antes citados, la figura I.11. muestra la representación gráfica del sub-espacio cromático dental en CIELAB y en CIE L*C*h*.

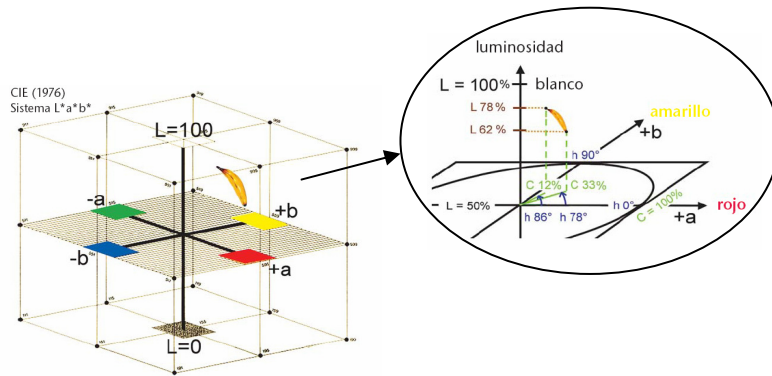


Figura I.11. Posición del espacio cromático dental dentro de los espacios cromáticos CIELAB y CIE L*C*h*.

De la figura se puede deducir que los dientes que presentan mayor luminosidad tienen un mayor ángulo de tono (una mayor proporción de amarillo) y menor cromancia. Sin embargo, cuanto más oscuro sea el diente (menor luminosidad) mayor es su cromancia y menor el ángulo de tono, es decir, mayor proporción de rojo.

El rango de coordenadas cromáticas y su distribución dentro del espacio cromático de los dientes han sido descritos en numerosas investigaciones (Joiner, 2004). Este rango debe incluir al total de la población; en ese sentido, cabe destacar que, en general, en la bibliografía se afirma que no hay diferencias en el color de los dientes según el sexo, aunque un reciente estudio (Odioso y cols., 2000) concluye que L^* es menor para los varones, con una media de 3.7 unidades CIELAB menos que la media del valor de L^* para mujeres. Por otra parte, en este estudio, los resultados no permitían sacar conclusiones sobre la influencia del factor etnia en el color final del diente.

Los dientes presentan una tendencia significativa hacia el amarillo y oscurecen con la edad. El impacto de la edad sobre el color del diente es debido, como ya hemos comentado, a la variación del espesor, composición y estructura de

los tejidos dentarios a lo largo de la vida. En el trabajo antes mencionado (Odioso y cols., 2000) se concluye que, por cada año de vida, el diente sufre un cambio de aproximadamente $0.10b^*$ unidades hacia la región de los amarillos y la media de la luminosidad decrece $0.22 L^*$ unidades. También señalan que esta variación es más rápida en varones que en mujeres. El consumo de bebidas cromógenas, café, té, vino tinto, etc. afecta de forma significativa al valor de las coordenadas cromáticas. Individuos que consumen diariamente café o té presentan, de media, un crecimiento de 1.2 unidades en b^* y un decrecimiento de 1.5 unidades en L^* .

En general, los dientes anteriores maxilares son ligeramente más amarillos que los mandibulares (Goodkind y cols., 1987) y el incisivo central maxilar presenta mayor luminosidad que el lateral y el canino (Goodkind y cols., 1987; Zhao y Zhu, 1998; Hasegawa y cols., 2000a; Hasegawa y cols., 2000b). El tercio medio dentario se considera que es la zona coronaria que mejor representa el color del diente natural. Por un lado, el tercio incisal es muy translúcido, por lo que su percepción cromática está afectada por el fondo, mientras que en el color del tercio cervical influye la cercanía del margen gingival. Por estos motivos, en los trabajos de investigación sobre color en dientes, es el tercio medio la zona donde se suelen realizar las mediciones.

Como se ha indicado anteriormente, el rango de coordenadas cromáticas y su distribución dentro del espacio cromático de los dientes han sido descritas en numerosas investigaciones. Goodkind y cols. (1987), y Schwabacher y Goodking (1990) realizaron estudios *in vivo* en el que, empleando una colorímetro de fibra óptica calibrado con un espectrofotómetro, midieron las coordenadas cromáticas en el tercio medio vestibular de 2832 dientes anteriores. Encontraron, para el tono, un rango de 4.49YR a 2.26Y, para la luminosidad (valor) 5.66-8.48 y para el croma de 1.09-4.96. Otros estudios han empleado el sistema Munsell para la evaluación de la distribución del espacio cromático de los dientes o, incluso, los valores triestímulo. Un compendio de estos trabajos se puede encontrar en las publicaciones de Miller (1987) y O'Brien y cols. (1997).

También se han realizado numerosos trabajos sobre el color de los dientes *in vivo* midiendo incisivos centrales superiores y empleando para su especificación el espacio CIELAB. Los más importantes se resumen en la tabla **I.1**. (Joiner, 2004).

Los resultados de estos trabajos muestran el rango del color de los dientes naturales en este espacio cromático.

Referencia	Método	Sujeto demográfico			Coordenadas de color		
		País	Nº	Edad	L*	a*	b*
Gegauff y cols., 1993	Colorímetro	USA	20	20-27	51.1	-0.1	-0.2
Rubinô y cols., 1994	Colorímetro	España	600	15-50	67.6±7.0	4.3±2.1	12.1±3.3
Zhao y Zhu, 1998	Espectrofotómetro	China	70	18-70	51.48±8.02	0.62±0.14	0.15±0.02
Odioso y cols., 2000	Espectrofotómetro	USA	180	13-64	69.3±5.92	5.40±1.33	18.7±3.37
Russell y cols., 2000	Espectrofotómetro	Irlanda	7	Estudiantes	48.31	1.35	2.73
Russell y cols., 2000	Espectrofotómetro	Irlanda	7	Estudiantes	41.31	-0.91	4.91
Hasegawa y cols., 2000 ^a	Espectrofotómetro	Japón	87	13-84	73.0±8.0	3.5±1.5	16.5±5.0

Tabla I.1. Valores L^* a^* b^* registrados en incisivos centrales superiores *in vivo* (Joiner, 2004).

Hasegawa y cols. (2000a) y Hasegawa y cols. (2000b), midieron el color del diente en cinco diferentes posiciones del eje de la superficie vestibular del incisivo central superior empleando un espectrofotómetro, encontrando que existen variaciones significativas de los valores de L^* , a^* y b^* a lo largo de dicho eje. Para L^* , los valores máximos se encuentran en el tercio medio ($L^*=73$). El valor de L^* fue más bajo en la zona cervical ($L^*=69$) y significativamente menor en el tercio incisal ($L^*=64$). Por lo que se refiere a a^* , los valores más altos se encontraron en la zona cervical (8.5) disminuyendo de una forma progresiva y significativa en dirección incisal (2.0). Para b^* la zona cervical, de nuevo, fue la que presentaba los valores más elevados (20) cayendo de forma gradual y significativa, igualmente, en dirección incisal (13). En cuanto a la translucidez, se ha demostrado que disminuye desde incisal al tercio medio (Hasegawa y cols., 2000b).

I.2.3. Medición del color en Odontología

La medición del color en Odontología se ha realizado mediante dos tipos de técnicas, la visual o subjetiva y la instrumental u objetiva (Van der Burgt y cols., 1990):

1. *Subjetiva*: se basa en la comparación del objeto (diente) con muestras de color que pueden ser de papel, de resina o de porcelana. Éste es el método que más se emplea en la práctica clínica y en el que se fundamentan las guías de color que se utilizan

en Odontología.

2. *Instrumental*: mediante el uso de colorímetros, espectrofotómetros, espectrorradiómetros, o mediante técnicas digitales de análisis de imagen.

Las *guías de color* son las herramientas que se utilizan en clínica para la medición del color mientras que los instrumentos usuales de medida de color, antes citados, suelen ser empleados en laboratorios de investigación fundamentalmente. El desconocimiento por parte del clínico del manejo, las condiciones de iluminación y medida, la interpretación de los resultados, así como su alto coste hace que estos dispositivos no sean empleados usualmente en clínica.

En el siguiente apartado se describen algunas de las guías más empleadas en Odontología. En cuanto a los instrumentos, su fundamento es bien conocido y sólo citaremos algunos de los instrumentos comerciales disponibles en el mercado.

I.2.3.1. Medición del color mediante guías dentales

Las guías dentales suelen constar de tablillas de color que se comparan sucesivamente con el diente, en idénticas condiciones de iluminación, hasta encontrar aquella que presenta una mayor similitud cromática. La utilización de guías para medir el color en Odontología constituye un procedimiento subjetivo y son muchas las variables que influyen en el resultado: la iluminación, la experiencia profesional, la edad, los colores del entorno, el ángulo de visión del diente y la tablilla, la ropa y maquillaje del paciente y desde luego, la capacidad perceptiva cromática del observador (Yap y cols., 1999; Ragain y Johnston, 2001).

Las guías de color son indispensables, tanto para la selección del color dental y de los materiales en clínica como para comunicar éste al laboratorio en el caso de que la restauración se realice con materiales que precisan ser elaborados allí. Sin embargo, lamentablemente, no existe ninguna escala que consiga reproducir todos los colores existentes en los dientes naturales y, por tanto, no existe una guía de

color ideal. A pesar de sus limitaciones, las guías más utilizadas son la Vitapan Classical[®] y la Vitapan 3D Master[®] de Vita, y la Chromascop[®] de Ivoclar-Vivadent.

I.2.3.1.1. Vitapan Classical[®]: la Vita Classical[®] es el referente para las guías de color. Se divide en cuatro grupos de tonalidades: A (marrón), B (amarillo), C (gris) y D (rojizo). Al utilizarla, lo primero que se determina es a qué grupo pertenece el diente, es decir, al grupo A, B, C o D, por lo que lo primero que determinamos es el tono. En esta guía, además, hay varios niveles de croma para el mismo tono. Por ejemplo, para el tono A, tenemos el A1, A2, A3, A3,5 y A4, siendo el A1 menos saturado que el A4. La luminosidad disminuye con el número, siendo, en este mismo ejemplo, el A4 menos luminoso que el A1. Esta guía consta, pues, de las siguientes tablillas: A1; A2; A3; A3.5; A4; B1; B2; B3; B4; C1; C2; C3; C4; D2; D3 y D4 (figura I.12.).



Figura I.12. Guía Vitapan Classical[®] de Vita.

A pesar de ser la más ampliamente utilizada en clínica, por su extrema facilidad de uso, esta escala posee muchos inconvenientes, entre los que podemos destacar:

- En caso de ser usadas para la toma de color a la hora de realizar una restauración cerámica, las tablillas poseen un espesor inadecuado, que normalmente varía entre 4 a 5 mm, y que deberá ser reproducido en solamente 1 a 1.5 mm de cerámica
- Las tablillas no cubren todo el espacio cromático dental, es decir, en ella no están representadas todos los posibles colores de los dientes naturales humanos (figura I.13.).
- Sus variaciones de color no están sistemáticamente distribuidas en el espacio cromático dental.

Para una correcta selección del color dental, el fabricante recomienda ordenar las 16 tablillas en orden decreciente de luminosidad: B1, A1, B2, D2, A2, C1, C2, D4, D3, A3, B3, A3.5, B4, C3, A4 y C4.

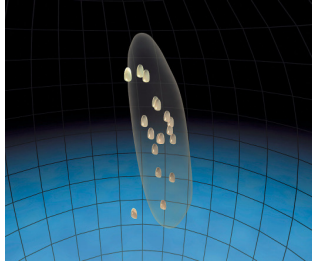


Figura I.13. Distribución de las tablillas de la guía Vitapan Classical® cromática en el espacio cromático dental (tomado de Vita®).

I.2.3.1.2. Vitapan 3D Master®: en febrero de 1998 Vita lanzó al mercado esta nueva escala con el objetivo de minimizar los problemas de la Classical®. Esta guía contiene 26 tablillas (figura I.14.) que están divididas en 5 grupos de acuerdo con su luminosidad. Dentro de cada grupo, las tablillas se ordenan según el croma creciente (vertical hacia abajo, 1; 1.5; 2; 2.5 y 3) y según el tono o matiz (horizontalmente, amarillento, medio y rojizo). En cada tablilla se aprecian una serie de números:

- El situado más arriba indica el grupo de valor al que pertenece la tablilla, del 1 al 5, en orden decreciente.
- El nº detrás de la letra indica el croma (1, 1.5, 2, 2.5, 3) en orden creciente
- La letra indica el tono, que puede ser M (medio), L (amarillento), R (rojo).

Esta guía incorpora, además, tres colores de blanqueamiento el 0M1, 0M2, 0M3: el 0 indica alta luminosidad, el 1, 2, y 3 el nivel de croma y la M el tono, que corresponde al medio.

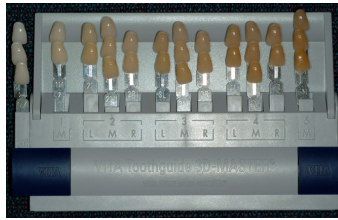


Figura I.14. Guía Vitapan 3D Master® de Vita.

Al usar esta guía, primero se selecciona la luminosidad, luego el croma y finalmente el tono o matiz. Entre sus ventajas, que son apuntadas por el propio fabricante, están:

- La mejor distribución de muestras dentro de las variaciones de colores de los dientes naturales existentes.
- Distribución sistemática de las tablillas en el espacio cromático que ocupan los dientes naturales (figura I.15.).

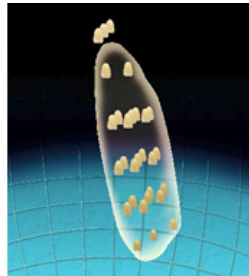


Figura I.15. Distribución de las tablillas de la Vitapan 3D Master® en el espacio cromático dental.

I.2.3.1.3. Chromascop®: esta guía es la utilizada por Ivoclar Vivadent en sus sistemas cerámicos. Presenta 20 muestras divididas en 5 grupos de matices, según la siguiente numeración: 100 (blanco), 200 (amarillo), 300 (marrón claro), 400 (gris) y 500 (marrón oscuro). Cada grupo posee 4 muestras (figura I.16.) ordenadas en croma creciente, con el número 10 correspondiendo al más bajo y el 40 al más elevado. Se utiliza de forma similar a la Vitapan Classical®, eligiendo primero el matiz y luego el nivel de croma.



Figura I.16. Guía Chromascop® de Ivoclar Vivadent.

I.2.3.1.4. Vita Bleachedguide 3D Master®: recientemente Vita ha lanzado al mercado esta nueva guía que, según el fabricante, permite determinar de forma sistemática y segura el color de los dientes blanqueados. La composición de esta guía sigue el principio de la guía Vitapan 3D Master®, basado en los tres parámetros del color (luminosidad, intensidad y tonalidad cromática), incluyendo además más muestras de colores adicionales entre los niveles de claridad e intensidad. Como se puede observar en la figura I.17., esta nueva guía consta de 15 tablillas del tono M con 5 niveles de croma y 11 niveles de luminosidad.



Figura I.17. Vita Bleachedguide 3D Master®.

I.2.3.2. Medición del color mediante sistemas instrumentales

En la actualidad están apareciendo en el mercado una serie de instrumentos electrónicos destinados a facilitar y objetivar el proceso de la toma de color de una manera más precisa, fiable y repetible. Por tanto, estos sistemas comerciales están diseñados para ayudar a clínicos y técnicos de laboratorio en el manejo del color en

la práctica clínica. Entre ellos se incluyen los colorímetros, espectrofotómetros, analizadores digitales del color e instrumentos híbridos que combinan estas tecnologías.

El principal inconveniente de estos sistemas electrónicos es su coste elevado y, en algunos casos, la complicación técnica, lo que hace que algunos profesionales desestimen su utilización.

Como ventajas presentan la eliminación de la subjetividad en el proceso de toma de color y una gran mejora en la reproducibilidad del mismo, la eliminación del factor ambiental en la toma de color, al utilizar fuentes de luz constantes y el ser calibrados cada vez que se emplean.

1.2.3.2.1. Colorímetros dentales

Un *colorímetro dental* mide las áreas de longitudes de ondas del espectro de luz visible (Devigus, 2004). Presentan la ventaja de incorporar una fuente de luz que les permite no depender de las condiciones de iluminación del entorno, así como disponer de una punta lo suficientemente pequeña para poder tomar el color de diferentes zonas de una superficie dentaria y la posibilidad de estandarizar, mediante posicionadores, la zona del diente en la que medimos el color. No obstante, su aplicación en la clínica dental se ve dificultada por la superficie convexa de los dientes, lo que complica la correcta colocación de la punta lectora del colorímetro, aspecto esencial para obtener mediciones fiables (Amengual, 2005).

El primer colorímetro específicamente diseñado para medir el color en los dientes fue el Chromascan[®], a principios de los 80. Tuvo poco éxito por la dificultad de su uso y la limitada precisión.

El ShadeEye NCC (Natural Color Concep) Chroma Meter[®] (Shofu Dental, 1997) supuso la segunda generación de colorímetros dentales. Este instrumento, que fue desarrollado por Minolta y Shofu, es del tipo sonda de contacto con ventana circular que usa un flash de xenón pulsado para iluminar la superficie dentaria. La

luz se proyecta sobre el diente en forma de donut, de manera que el centro de la sonda (por donde no sale luz) recibe la luz que despide el diente, y a través de una guía de luz este haz reflejado llega al detector, que es el que lleva a cabo la cuantificación.

El diseño del tipo del instrumento y la naturaleza translúcida del diente hacen que la medición pueda verse afectada por el “scattering”, es decir, que parte de la luz se pierda para la lectura, que no pase por la ventana del instrumento. Esto hace que, por ejemplo, una cerámica aparentemente igual que un diente natural, de diferente lectura. Para corregir esta discrepancia, se ha incorporado al ShadeEye un sistema de selección previa del material sobre el que se va a trabajar y que hay que seleccionar antes de la calibración del instrumento. Esta selección del modo, seguramente modifica los algoritmos matemáticos que utiliza el dispositivo para la medida del color. Tras la selección del modo (diente, porcelana o blanqueamiento), se calibra y se selecciona el diente a medir. Se hacen de 3 a 5 medidas y la media es la que proporciona finalmente. Suministra los siguientes datos: número de diente, color en Vitapan 3D Master[®], Chromascop[®], Vitapan Classical[®], NCC and Biodent., y ratios opaquero/cuerpo/esmalte que el técnico puede aplicar. Está diseñada para el Vintage Halo Porcelain System[®] (Shofu Dental) aunque trae referencia también a otros sistemas cerámicos.

1.2.3.2.2. Espectrofotómetros dentales

Estos aparatos registran el área de longitudes de onda de la luz visible entre aproximadamente 380 y 720 nm en pequeños intervalos de longitudes de onda (Devigus, 2004).

El Vita Easyshade[®], es quizás el más popular. Este espectrofotómetro, portátil y digital, está integrado por una unidad central con pantalla y por un terminal con una fuente de luz y un lector. Este terminal presenta unas fibras ópticas para la iluminación de la superficie (halógenas) y tres espectrómetros para el proceso de medida. Uno monitoriza la emisión de la luz mientras que los otros dos miden la luz dispersa por el diente a dos distancias diferentes al punto donde incide para evitar

el “scattering” en lo posible. Compara los colores de la guía Vitapan 3D Master® y la Vitapan Classical®.



Figura I.18. Espectrofotómetro Easychade® de Vita.

Otro de los espectrofotómetros dentales más usados es el Identa Color II® de la casa Iidenta. Está compuesto por un terminal con una fuente de luz y un lector, conectado a una unidad central con pantalla. Permite comparar con las guías de color de la casa Vita (Vitapan Classical® y Vitapan 3D-Master®), Dentsply y Vivadent, así como también, permite la toma de color en un punto del diente o en cinco zonas del mismo de forma simultánea. Además, dispone de un dispositivo de impresión en papel de los valores registrados.

I.2.3.2.3. Sistemas de análisis digital

Los nuevos dispositivos para la medición del color dental se basan en sistemas digitales de análisis de imagen que se combinan con valoraciones colorimétricas que dan lugar a auténticos mapas de color.

El primero de estos sistemas ha sido el ShadeScan® (Cynovad, 2000). Consiste en una especie de pieza de mano que consta, entre otras cosas, de un sistema de iluminación halógena y una pantalla LCD desde donde se monitoriza la imagen a captar. El sistema graba la imagen e incluso, comentarios del operador. Los datos se almacenan en un archivo que se puede visualizar mediante un software que genera el “mapa” cromático, o que se manda directamente al laboratorio donde con un sistema informático equivalente, proceden a su

visualización. Suministra datos en Vitapan Classical® e incluso un mapeado del tono, croma, y luminosidad.

El ShadeVision System® (X-Rite, 2001) (figura I.19.) combina también un sistema de análisis de imagen digital con un colorímetro y básicamente consta de los mismos componentes que el anterior, aunque su sistema difiere en su funcionamiento.

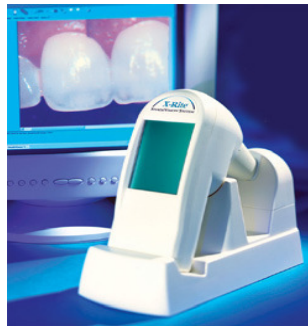


Figura I.19. ShadeVision System® (X-Rite).

I.2.3.2.4. Sistemas híbridos

El SpectroShade® es el único dispositivo que combina el análisis digital de imágenes con el análisis espectrofotométrico. Es el más completo, complejo y, además, el más caro. Es el más flexible de utilizar. La unidad consta de una fuente de luz halógena y la luz reflejada se transmite a dos detectores CCD (charge-coupled-device) a través de un sistema de lentes: uno se usa para generar la imagen en color digital del diente y el otro (detector blanco-negro) para el análisis espectral. La imagen en tiempo real del diente se ve en el monitor. El sistema hace un análisis espectral (curva espectral) en la imagen pixel a pixel lo que representa una cantidad enorme de datos. Una vez realizada la captura y el análisis espectral de los píxeles de la imagen, el software ofrece muchas posibilidades: da el color del diente completo y por tercios (gingival, medio e incisal) en varios sistemas y además permite muchos tipos de análisis, como comparar imágenes antes y después de un blanqueamiento, la imagen del diente y con la de la corona en el laboratorio, etc.

El ClearMatch System® es el más reciente. Se utiliza con Windows y sirve cualquier cámara digital. Como el resultado de una imagen digital depende de una multitud de variables (características espectrales de la luz del flash, de la ambiental, la fotosensibilidad del CCD de la cámara, características de los filtros, etc), esta tecnología permite controlar todas estas variables y estandariza los registros. El programa corrige y calibra la imagen inicial y ofrece un mapa cromático del diente. Además, permite cargar las guías de color de los sistemas cerámicos o cualquier otra y ofrecer los datos en ellas.

Como conclusión podemos decir que probablemente en un futuro no muy lejano dispongamos de sistemas de medición digital de color, sencillos de utilizar, fiables y a un precio asequible.

I.3. Blanqueamiento Dental

Antes de definir el concepto de *blanqueamiento dental* conviene recordar que el color de nuestros dientes no es uniforme, esto es, y como ya se ha mencionado antes, la coloración de las diferentes partes del diente es variada. Así la corona dental suele tener un componente más amarillento en la zona cervical con forma de semiluna de concavidad incisal/oclusal, y una característica translucidez más marcada en los dientes jóvenes y en aquellos que no han sufrido procesos consuntivos (atrición, erosión, etc.) (Amengual y cols., 2002).

Se conoce como *discoloración dentaria* a la alteración del color de los dientes y que supone una modificación, incremento o pérdida del color dental, bien sea de carácter fisiológico o patológico (Amengual y cols., 2002). Las discoloraciones dentales varían en etiología, apariencia, localización, gravedad y adhesión a la estructura dentaria. Pueden ser intrínsecas, extrínsecas o una combinación de las mismas (Dahl y Pallesen, 2003).

I.3.1. Patología de las discoloraciones dentales

Atendiendo a la causa de la localización y su localización tisular, éstas se pueden clasificar, siguiendo a Amengual y cols. (Amengual y cols., 2002), en:

I.3.1.1. Discoloraciones vinculadas a la placa dental

La *placa dental* no es más que un conjunto de sedimentos que se depositan sobre la superficie del diente, capaz de alterar el color de ésta. Se trata de una coloración externa, que puede a su vez clasificarse por su etiología:

I.3.1.1.1. Microbianas: producidas por bacterias y hongos. Pueden presentar las siguientes coloraciones:

- **Verdes:** es la coloración más frecuente de origen microbiano, causadas por bacterias como el *Bacillus pyocianicus* o bien por hongos como el *Penicillium glaucum*. Aparece en forma de semiluna cervical.
- **Marrones y negras:** aparecen en niños/as, como un festón cervical que recidiva con mucha facilidad. Éstas se originan por el depósito del óxido ferroso generado como consecuencia del metabolismo bacteriano.
- **Anaranjadas:** también afectan a niños/as, localizándose en el tercio gingival de las superficies dentales vestibular y lingual/palatina. Algunos de los gérmenes implicados en esta discoloración son el *Bacillus prodigiosus*, el *Micrococcus roseus* y el *Flavobacterium lutescens*.
- **Blancas:** suelen ser una mezcla de gérmenes (*Lectotrix*) con restos alimentarios y celulares.

I.3.1.1.2. Alimentarias: la patogenia de estas discoloraciones recoge un doble mecanismo: la deposición de colorantes ajenos a la placa, de origen exógeno, y la modificación de las proteínas de la placa debido a elementos alimentarios, lo que favorecería la captación de otros colorantes. Son muchos los componentes

alimentarios que pueden dar discoloraciones, desde el amarillo del pimentón y el azafrán, al negro de la regaliz, pasando por el rojo de la remolacha, el verde de la clorofila o el azul-violeta de las cerezas.

I.3.1.1.3. Tabáquicas: en este caso, son los alquitranes del tabaco los que pueden producir una discoloración cuyo aspecto puede variar de amarillo oscuro o pardo a negro, localizándose en las grietas del esmalte u otros defectos de la superficie del diente.

I.3.1.1.4. Laborales: la discoloración se debe a la exposición prolongada y repetida a partículas en suspensión en ambientes en los que se manipulan metales. Los colores que pueden adoptar son muy variados y dependen del tipo de metal causante.

I.3.1.1.5. Iatrogénicas: generalmente están producidas por el uso continuado de colutorios u otros productos terapéuticos, como por ejemplo la clorhexidina, que produce una discoloración entre amarillento y parduzco, o bien el flúor de aminas, que por su parte, da lugar a una discoloración de color amarillo.

I.3.1.2. Discoloraciones del esmalte

I.3.1.2.1. Ocurridas durante la formación del esmalte:

- **Fluorosis:** aparecen cuando se consumen fluoruros en concentraciones superiores a 1 ppm durante un largo período de tiempo, coincidiendo con la formación del esmalte. Sus manifestaciones clínicas son muy variadas, desde pequeños punteados blancos hasta discoloraciones de aspecto marrón negruzco.
- **Amelogenesis imperfecta:** consiste en una anomalía hereditaria que cursa con alteración del desarrollo del esmalte, con cuatro formas de manifestación clínica: hipoplásico, hipomadurativo, hipocalcificado y mixto (asociado a taurodontismo). La discoloración

varía desde un moteado blanco hasta afectaciones extensas de color amarillo-marrón.

- **Defectos de desarrollo del esmalte:** se incluyen aquí aquellas alteraciones cromáticas y/o morfoestructurales congénitas de los dientes. Pueden deberse a factores sistémicos o locales. Los primeros pueden estar producidos por alteraciones cromosómicas, como la trisomía del par 21; infecciones; enfermedades hereditarias, como la epidermolisis bullosa o alguna mucopolisacaridosis; estados de malnutrición; alteraciones metabólicas; alteraciones neurológicas (parálisis cerebral); y enfermedades exantemáticas. Entre los segundos se encuentran los traumatismos en dientes temporales con afectación del germen del diente permanente y las infecciones locales que también afectan al germen en desarrollo, como por ejemplo el “diente de Turner”, en el que aparece un islote de tejido cementoide (que se tiñe fácilmente) en la corona dentaria.
- **Idiopáticas.**

I.3.1.2.2. Ocurridas cuando el diente ya ha erupcionado:

- **Caries dental de localización en el esmalte:** ésta puede localizarse en las superficies vestibulares, como una discoloración blanca mate, o en fosas y fisuras, donde la lesión se presenta como una discoloración localizada y de poca extensión, puntiforme o filiforme, y de color negro.
- **Incorporación de metales:** se dan en ambientes industriales y su aspecto varía en función del metal implicado.

I.3.1.3. Discoloraciones del esmalte y de la dentina

I.3.1.3.1. Ocurridas durante la formación del diente:

- **Constitucional:** se incluyen aquí aquellas variantes en el color del diente que son consideradas como normales, dentro de la gama habitual que presenta un diente, pero que son percibidas con disgusto por su portador/a.
- **Administración de tetraciclinas:** la toma de estos antibióticos durante el período de formación del diente produce una discoloración que va desde el amarillo brillante hasta el marrón oscuro y que incluye incluso matices grisáceos o amoratados (figura I.20.). El tipo de discoloración varía según el tipo de molécula que la origina. Los dientes muestran una fluorescencia amarilla brillante con la luz ultravioleta. Dependiendo del momento del desarrollo implicado en esta alteración se producirá una afectación mayor o menor del diente y con una presentación en forma de banda horizontal correspondiente a la zona tisular involucrada. El período en el que los dientes son susceptibles de cambiar de color por esta causa, y en el que hay que evitar la administración de tetraciclinas va desde el cuarto mes del embarazo hasta los ocho años de edad.



Figura I.20. Imagen de un paciente con tinción por tetraciclinas.

- **Odontodisplasia regional:** conocida también como “diente fantasma”, esta anomalía del desarrollo se caracteriza por presentar un esmalte muy fino y una pequeña zona dentinaria que rodean a una cámara pulpar amplia. Afecta a un grupo de dientes.
- **Porfiria eritropoyética congénita:** esta enfermedad hereditaria, en la cual hay un aumento de la excreción de porfirinas, aparece en la dentición temporal como una discoloración pardo-rojiza con una fluorescencia anaranjada-roja frente a la luz ultravioleta.

I.3.1.3.2. Por afectación del diente erupcionado:

- **Envejecimiento:** con el paso del tiempo los dientes modifican su color paulatinamente adquiriendo un color amarillento-marrón, debido a cambios en la composición del esmalte y a la fibrosis y calcificación del complejo dentino-pulpar.
- **Caries amelodentinaria:** las formas agudas se caracterizan por un color amarillo o marrón claro, con una consistencia blanda y la cavitación característica. Las formas crónicas, también cavitadas, son de color marrón oscuro o negro y de fondo duro.
- **Tabáquicas.**
- **Saturnismo:** la intoxicación por plomo produce una discoloración grisácea de los dientes y también de las encías.

I.3.1.4. Discoloraciones de la dentina

I.3.1.4.1. Ocurridas durante la formación del diente:

- **Dentinogénesis imperfecta:** consiste en una alteración hereditaria del desarrollo de la dentina, asociada o no a osteogénesis

imperfecta. Se caracteriza por presentar una importante atricción con un esmalte que se desprende con facilidad. Las discoloraciones son de color marrón azulado con un característico aspecto esmerilado.

- **Displasia dentinal:** en este caso, los dientes presentan una menor translucidez y un color amarillento.
- **Hiperbilirrubinemia:** cuando la bilirrubina se encuentra en niveles altos, ésta se precipita en el complejo dentino-pulpar. Su etiología es diversa:
 - Incompatibilidad Rh o de grupo sanguíneo.
 - Atresia, hipoplasia o agenesia biliares.
 - Hepatitis neonatal.
 - Hipotiroidismo congénito.

Los dientes adquieren una discoloración amarilla o verde (clorodoncia) causada por la biliverdina, producto de degradación de la bilirrubina. Se pueden asociar defectos de desarrollo del esmalte.

- **Enfermedades hemáticas:**
 - Anemia ferropénica: produce una alteración cromática del diente de aspecto azul blanquecino.
 - Anemia drepanocítica: produce una discoloración marrón.
 - Talasemia: también produce una discoloración marrón.
 - Porfiria eritropoyética congénita: en este caso, los dientes permanentes aparecen con una coloración pardo-rojiza y una fluorescencia anaranjada-roja frente a la luz ultravioleta.
- **Enfermedades endocrinas:**
 - Hipotiroidismo: produce una discoloración marrón.

- Hipertiroidismo: los dientes pueden mostrar un color blanco azulado.
- Hipoadrenalismo: origina un cambio de color en los dientes de aspecto verdoso.
- Hiperadrenalismo: los dientes pueden aparecer de un color amarillo claro.
- Ocronosis (alcaptonuria): los depósitos de pigmentos oscuros que se originan en este caso, provocan una discoloración marrón en los dientes.

I.3.1.4.2. Por afectación del diente erupcionado:

- **Necrosis pulpar.**
- **Hemorragia pulpar.**
- **Iatrogenia:**
 - Obturaciones con amalgama de plata: la discoloración gris verdosa o negruzca está producida por los productos de corrosión de la amalgama de plata, los cuales aparecen con el tiempo en la periferia de dichas obturaciones.
 - Postendodóncicas: debidas a los colorantes de la gutapercha, a las puntas de plata, a la permanencia de residuos orgánicos en la cámara pulpar y al uso de algunos productos químicos durante el tratamiento endodóntico.
 - Obturación temporal con cementos a base de cobre: produce una discoloración verde o verde azulada.
 - Aplicación intracavitaria de fluoruro de estaño: origina una discoloración de aspecto amarillo-marrón.
 - Deterioro de materiales de obturación (silicatos, ionómeros, composites u obturaciones provisionales).
- **Calcificación pulpar periférica:** consiste en una neoformación dentinaria, como consecuencia de un traumatismo dentario, que

estrecha o llega a obliterar la cámara y los conductos pulpares, lo que conduce a un oscurecimiento del diente de aspecto amarillento.

- **Resorción radicular:** da al diente un color rosado en el tercio cervical de la corona.

- **Captación de colorantes a causa de la exposición dentinaria:** debido a:
 - Procesos consuntivos dentarios: atricción, erosión, abrasión, mecánicos, por irradiación e idiomáticos.
 - Traumatismos coronales o coronoradiculares con exposición dentinaria.

I.3.2. Tratamiento de las discoloraciones dentales

El enfoque terapéutico de las alteraciones del color dental puede ir desde las coronas cerámicas o ceramometálicas de recubrimiento total, las carillas de cerámica o composite, las diferentes técnicas de blanqueamiento dental hasta los tratamientos combinados (Amengual y cols., 2002).

De estas alternativas terapéuticas, a continuación vamos a describir el concepto de *blanqueamiento dental*, sus indicaciones y contraindicaciones, los agentes blanqueadores, las diferentes técnicas de blanqueamiento disponibles, sus efectos adversos y la prevención de los mismos, y las limitaciones del tratamiento blanqueador.

I.3.3. Historia del Blanqueamiento Dental

Como ya hemos comentado anteriormente, la demanda en tratamientos estéticos ha aumentado en los últimos años y, dentro de éstos, uno de los procedimientos más solicitados es el *blanqueamiento dental*.

Los cánones de belleza han ido variando a lo largo de la historia. Así sabemos que los egipcios disponían de cosméticos antes del año 2000 A.C. Para éstos, unos dientes sanos y blancos simbolizaban salud, limpieza y fortaleza. En la antigua China Imperial, las viudas teñían sus dientes de negro como signo de renuncia a la belleza.

Tener unos dientes blancos y brillantes no es un deseo reciente, sino que ya se describen en textos romanos consejos para blanquear los dientes frotándolos con urea, especialmente si era de origen portugués. En la Edad Media, los barberos usaban para ello el “aquafortis”, con ácido cítrico (Amengual y cols., 2002).

Hace más de un siglo, Westlake (1895) describió como agente blanqueante una mezcla de peróxido y éter; en concreto, empleaba una solución acuosa de dióxido de hidrógeno al 13% conjuntamente con corriente eléctrica para acelerar el proceso de blanqueamiento. Ya en 1911, Ficher G. en su artículo *The bleaching of discolored teeth with H₂O₂* presentó sus trabajos sobre el blanqueamiento dental con peróxido de hidrógeno y la aplicación de instrumentos calientes. En 1918, Abbot introdujo el empleo de una mezcla estabilizada de peróxido de hidrógeno al 30% (llamada Superoxol) conjuntamente con el uso de lámparas generadoras de calor.

En 1960, Klusmier describió por primera vez la técnica para el blanqueamiento ambulatorio de dientes vitales mediante cubetas de acetato cargadas con material blanqueador (Haywood, 1992). Unos años más tarde, en 1968, los periodoncistas empezaron a utilizar el peróxido de carbamida como antiséptico en las férulas oclusales y Munro describió como efecto secundario un aclaramiento dental, confirmado también por los ortodoncistas al tratar las gingivitis de sus pacientes con este mismo producto.

Todas las observaciones acumuladas llevaron, en 1988, a Haywood y Heymann a realizar un ensayo clínico en la Universidad de Carolina del Norte que demostró la eficacia del peróxido de carbamida. Un año después, en 1989, publicaron un artículo (Haywood VB y Heymann HO, 1989) en el que se propuso el empleo de esta sustancia al 10% para el blanqueamiento dental. Los autores recomendaban utilizar férulas especialmente confeccionadas para este fin y que

auguraban la permanencia del producto blanqueador en contacto con el diente durante el tiempo suficiente como para que se produjera el efecto blanqueante. Así nació la denominada *técnica de blanqueamiento vital ambulatorio* y, en marzo de ese mismo año, se introducía en el mercado el primer producto a base de peróxido de carbamida específicamente diseñado para este fin, el White and Brite® de Omni Internacional.

Desde entonces, el blanqueamiento de dientes vitales ha recorrido un largo camino. En estos casi treinta años, han aparecido multitud de nuevos productos, en los que se modificaba la concentración del agente blanqueante, su forma de activación o se incluían en la composición diversas sustancias para minimizar los efectos secundarios del procedimiento. Esta evolución ha determinado que hoy en día, el blanqueamiento dental sea uno de los tratamientos más demandados en Odontología Estética.

I.3.4. Concepto de Blanqueamiento Dental

El *blanqueamiento dental* consiste en una alternativa terapéutica conservadora para el tratamiento de las discoloraciones dentales y que persigue conseguir un color dentario que satisfaga las necesidades estéticas del paciente. Se basa en la utilización de sustancias químicas de aplicación extradental (blanqueamiento externo) o intradental (blanqueamiento interno) cuyo mecanismo de acción está relacionado con su capacidad de actuar sobre las moléculas de los pigmentos responsables de la discoloración (Amengual y cols., 2002). El resultado de este procedimiento terapéutico depende principalmente del tipo de agente blanqueador, la concentración y la habilidad o capacidad de éste para alcanzar a las moléculas causantes de la discoloración, la duración y el número de veces que el agente está en contacto con dichas moléculas (Dahl y Pallesen, 2003); también influyen otros factores como el tipo de discoloración, la edad del paciente, así como el color inicial de los dientes (Joiner, 2006).

Dentro del blanqueamiento hay que distinguir dos grandes grupos en función de la vitalidad del diente a tratar. Por un lado está el *blanqueamiento vital*, que se realiza sobre dientes vitales y se corresponde con el blanqueamiento externo; y, por

otro lado, está el *blanqueamiento no vital*, que se realiza sobre dientes desvitalizados y que puede ser tanto interno como interno y externo de manera combinada (Amengual y cols., 2002).

Dado que el presente estudio clínico se realizó sobre dientes vitales, sólo describiremos la técnica de *blanqueamiento vital* o, lo que es lo mismo, *blanqueamiento externo*.

I.3.4.1. Indicaciones del Blanqueamiento Vital

Está indicado en discromías leves o moderadas, localizadas principalmente en el esmalte y la dentina superficial de dientes vitales. En concreto, siguiendo a Amengual y cols. (Amengual y cols., 2002), las discoloraciones en las que está indicado son:

- Por envejecimiento.
- Por hábitos higiénico-dietéticos inadecuados.
- Dientes con calcificación completa de la cámara pulpar y conductos radiculares.
- Fluorosis dental.
- Dentinogénesis imperfecta.
- Tinción leve o moderada por tetraciclinas.

I.3.4.2. Contraindicaciones del Blanqueamiento Vital

En primer lugar hay que atender a una serie de *contraindicaciones generales del blanqueamiento*, las cuales son (Amengual y cols., 2002):

- Signos de resorción radicular.
- Defectos en la formación del esmalte.
- Grietas y/o fisuras en la corona del diente.
- Caries dental.
- Enfermedad periodontal.
- Obturaciones en mal estado.
- Pacientes con mala higiene oral.

- Pacientes fumadores que no pueden renunciar a este hábito durante el período de tratamiento blanqueador.
- Embarazo y lactancia.

Como *contraindicaciones propias del blanqueamiento vital* tenemos (Amengual y cols., 2002):

- Dientes sensibles.
- Dentina expuesta.
- Superficie radicular expuesta.

I.3.4.3. Agentes blanqueadores y mecanismo de acción

Según su mecanismo de acción, éstos pueden clasificarse en cuatro grandes grupos (Amengual y cols., 2002):

- **Oxidantes:** agentes irritantes, dióxido de silicón, papaína, perborato sódico, peróxido de hidrógeno, peróxido de carbamida, odontoblastina y superóxido.
- **Erosivos:** ácido cítrico, clorhídrico, fluorhídrico, nítrico, ortofosfórico y poliacrílico.
- **Abrasivos:** bicarbonato sódico, carbonato cálcico, carborundo, citrato de cinc, citrato sódico, compuestos de aluminio, derivados del silicio, fosfato cálcico dibásico, piedra pómez y pirofosfato tetrapotásico.
- **Mixtos:** citroxaína y pirozona.

Hoy en día, a pesar de la amplia variedad de agentes blanqueadores, la mayoría de los métodos descritos relacionados con el blanqueamiento vital se basan en el uso directo de *peróxido de hidrógeno* (H_2O_2) o su precursor, *peróxido de carbamida* (Minoux y Serfaty, 2008). Estas sustancias que actúan como potentes oxidantes, mediante la formación de radicales libres, moléculas de oxígeno reactivas y aniones de peróxido de hidrógeno, penetran en el esmalte y la dentina atacando a las macromoléculas orgánicas altamente cromógenas, responsables de la discoloración. Al descomponerlas, los anillos carbonados pasan a convertirse en

cadenas lineales con dobles enlaces, aún cromáticas. Si el proceso persiste, los radicales libres terminan rompiendo los dobles enlaces y las cadenas carbonadas resultantes, ya con enlaces simples, se hacen incoloras. El resultado, es un aclaramiento del color del diente (Dahl y Pallesen, 2003).

I.3.4.4. Técnicas de Blanqueamiento Vital

Dentro del blanqueamiento vital, podemos distinguir entre aquellas técnicas que se realizan exclusivamente en la consulta dental, las que se realizan en casa bajo la supervisión del odontólogo (también llamadas *técnicas ambulatorias*) y las que se realizan de forma conjunta, primero en la clínica y luego en el domicilio del paciente (Amengual y cols., 2002).

Siguiendo a Amengual y cols. (Amengual y cols., 2002), podemos clasificar las diferentes técnicas de blanqueamiento vital en:

I.3.4.4.1. Blanqueamiento en la clínica dental:

- **Técnica de pulido aire-polvo:** consiste en eliminar las discoloraciones superficiales del esmalte causadas por la placa dental de forma abrasiva utilizando un aerosol con bicarbonato, agua y aire a presión.
- **Microabrasión del esmalte:** indicada en discoloraciones superficiales del esmalte muy localizadas (p.e. defectos de desarrollo del esmalte, fluorosis). Esta técnica combina la abrasión mecánica y la erosión química de la superficie del esmalte, mediante la aplicación por compresión rotatoria de compuestos ácidos (carbonato cálcico, piedra pómez, ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico, éter o peróxido de hidrógeno) utilizando para ello aplicadores manuales, pulidores mecánicos, cepillos de profilaxis o copas de goma.

- **Cepillado dental en la consulta:** consiste en la aplicación superficial de una pasta o solución blanqueadora de peróxido de carbamida (al 10-21%) con cepillos de profilaxis o copas de goma para eliminar tinciones de la placa y/o del esmalte superficiales.
- **Técnica de activación química:** se aplica sobre la superficie dental peróxido de carbamida o de hidrógeno a elevada concentración, bien sea de forma aislada o asociado a catalizadores y/o espesantes, dejándose actuar el tiempo suficiente en función de la discoloración.
- **Técnica de activación por calor:** empleada en casos de discromías intensas, resulta una técnica molesta para el paciente y presenta un elevado riesgo de efectos adversos iatrogénicos. Tras colocar el agente blanqueador sobre la superficie dental, se aplica una fuente de calor (p.e. lámparas térmicas) para acelerar la reacción de oxidación del producto y facilitar tanto la difusión como la penetración del mismo a través de la estructura del diente.
- **Técnica con férulas en la consulta:** está basada en el empleo de férulas individualizadas para uso domiciliario mediante las cuales se aplica el peróxido de carbamida o de hidrógeno a elevada concentración desde 30 minutos hasta 2 horas mientras el paciente permanece en la consulta.
- **Técnica fotoactivada:** en este caso, se utiliza una fuente de luz halógena convencional, plasma o el láser, para activar los agentes blanqueadores de alta concentración (peróxido de hidrógeno o de carbamida), ya que éstos incorporan catalizadores fotosensibles en su composición.
- **Técnica de gases hiperoxidantes:** los agentes blanqueadores que se emplean son el oxígeno y el ozono, aplicados mediante cubetas individualizadas.

I.3.4.4.2. Blanqueamiento ambulatorio:

- **Cepillado dental en el domicilio:** consiste en el cepillado dental con una pasta blanqueadora, generalmente con peróxido de carbamida al 10%, durante 5 minutos con un movimiento en sentido gíngivo-incisal. Se puede emplear en caso de discoloraciones leves y como complemento a otras técnicas blanqueadoras y en pacientes que no toleren las férulas por náuseas.
- **Técnica con férulas de uso domiciliario:** los dientes se blanquean aplicando una solución de peróxido de hidrógeno o de carbamida, o con una combinación sucesiva de ambos, aplicada en boca mediante férulas blandas. La concentración del agente y la pauta de duración del tratamiento varían dependiendo del tipo de discoloración.

Parece ser que la intensidad del cambio de color que se puede obtener con esta última técnica depende de varios factores, como por ejemplo la concentración del agente blanqueador (Haywood, 1997). Algunos trabajos como el de Kihn (Kihn, 1999) han demostrado que las bajas concentraciones (5%) de peróxido de carbamida requieren más tiempo de tratamiento para obtener los mismos resultados que con altas concentraciones en tiempos cortos. Asimismo, el tiempo de duración en que el agente está en contacto con el tejido dentario y la duración del tratamiento son otros factores importantes. En general, las casas comerciales recomiendan un tiempo mínimo de aplicación de dos horas ya que los estudios de degradación del material blanqueador muestran que, pasadas dos horas de aplicado el material en boca, se conserva el 52% de su porcentaje en peso y el 10% al cabo de diez horas (Wille, 2003). En cuanto a la duración del tratamiento, en el caso de dientes vitales, con dos semanas de tratamiento se puede lograr un aclaramiento clínicamente notorio y satisfactorio para el paciente (Haywood, 1991; Haywood, 1999; Leonard y cols., 2001).

Actualmente, la mayoría de los estudios coinciden en que la técnica ambulatoria con férulas es segura si se maneja adecuadamente. Entre sus ventajas destacan: la facilidad de aplicación, el buen resultado en el cambio de color en el

esmalte y dentina, su bajo costo y la accesibilidad para la mayoría de la población (Melo y cols., 2006).

- **Tiras de plástico:** se trata de unas tiras de plástico flexibles de un solo uso, recubiertas con un gel de peróxido de hidrógeno o de carbamida a baja concentración, para aplicarlas directamente sobre la superficie vestibular de los dientes. Este tipo de blanqueamiento entra dentro del grupo de blanqueamientos “sin receta”, esto es, no prescritos por el odontólogo y que, demostrada su eficacia, tienen como inconveniente precisamente la no supervisión del profesional durante el tratamiento (Gerlach y cols., 2000; Joiner, 2006).
- **Barnices blanqueadores:** consiste en aplicar sobre la superficie seca de los dientes un barniz de peróxido de carbamida, a baja concentración e insoluble en saliva, mediante un pincel o brocha y dejándolo actuar unos minutos, para seguidamente eliminarlo con el cepillado dental. Al igual que las tiras blanqueadoras, los barnices son productos que suelen aplicarse sin la supervisión del profesional clínico (Gerlach y cols., 2000; Joiner, 2006).

I.3.4.4.3. Blanqueamiento combinado: para conseguir un mayor beneficio, acortando también la duración del tratamiento en casa, se pueden combinar una fase inicial en clínica, empleando cualquiera de las técnicas anteriores, seguida de una fase domiciliaria con peróxido de hidrógeno o de carbamida y complementada con el cepillado dental con pastas blanqueadoras, alargando así los efectos del blanqueamiento el mayor tiempo posible.

I.3.4.5. Efectos adversos del Blanqueamiento Vital y su prevención

Las sustancias químicas empleadas para blanquear los dientes vitales son, generalmente, sustancias cáusticas que pueden alterar y dañar las estructuras orales no involucradas directamente en el tratamiento.

Puede haber *efectos adversos locales* sobre los tejidos dentarios y sobre los tejidos blandos, pero también *efectos sistémicos*, aunque estos últimos son raros, poco frecuentes y, normalmente, de origen accidental (Minoux y Serfaty, 2008).

A nivel del *esmalte*, puede haber alteraciones de la rugosidad superficial (Ernst y cols., 1996) y un ligero aumento de la porosidad superficial (Spalding y cols., 2003; Yeh y cols., 2005), así como también la disminución de la dureza del mismo, exposición de los prismas, etc. Estos efectos no parecen aumentar la susceptibilidad del esmalte a la caries dental (Al-Qunalan, 2005; Pretty y cols., 2005) y, en cualquier caso, se pueden minimizar con la aplicación de flúor durante y tras finalizar el tratamiento blanqueador (Basting y cols., 2003). Sí es cierto que, debido a este aumento en la rugosidad y porosidad superficial del esmalte, el diente se hace más susceptible a las discoloraciones extrínsecas durante y después del blanqueamiento, por lo que se aconseja evitar fumar e ingerir alimentos y bebidas que puedan teñir los dientes (p.e. remolacha, zanahoria, vino tinto, etc) (Amengual y cols., 2002).

A nivel del *complejo dentino-pulpar*, es bastante frecuente la aparición transitoria de sensibilidad al frío, normalmente reversible (Leonard y cols., 2001; Jorgensen y Carroll, 2002; Pohjola y cols., 2002). Esta sensibilidad se atribuye principalmente a la penetración del agente blanqueador dentro de la cámara pulpar, originando una pulpitis reversible (Gokay y cols., 2004). Además, en algunas técnicas, la aplicación de calor durante el tratamiento blanqueador produce un aumento de temperatura, lo que favorece la difusión del peróxido hacia la pulpa (Bowles y Ugwuneri, 1987). Esta sensibilidad puede desaparecer con la interrupción del tratamiento, modificando la dosis y la pauta de aplicación (Haywood y cols., 1994; Leonard y cols., 1997; Matis y cols., 1998), o con el empleo agentes desensibilizantes y/o analgésicos (Haywood y cols., 2001; Leonard y cols., 2004).

También es posible que se produzca resorción radicular dada la capacidad del peróxido de hidrógeno para irritar al tejido pulpar, con la consiguiente estimulación y formación de las células responsables de la destrucción de la dentina y el cemento radicular (Dahl y Pallesen, 2003).

Con respecto a la *encía* y la *mucosa oral*, si el agente entra en contacto con estos tejidos, puede aparecer una leve irritación de los mismos de carácter reversible (Leonard y cols., 1997). Excepcionalmente, podrían aparecer quemaduras y escaras que en ocasiones pueden progresar y llegar incluso a la necrosis del tejido afectado (Amengual y cols., 2002). Para prevenir estos posibles efectos adversos, cuando se trata de una técnica ambulatoria, se aconseja extender las férulas cubriendo sólo la superficie del esmalte para evitar que el agente blanqueador contacte con los tejidos gingivales (Minoux y Serfaty, 2008). En el caso de que la técnica se lleve a cabo en la consulta dental, es recomendable el uso del dique de goma o cualquier sistema de retracción gingival temporal y reversible, que también impida el contacto del agente blanqueador con la encía y la mucosa oral. Además, en este mismo caso, es imprescindible el uso de gafas protectoras tanto para el paciente como para el profesional y el auxiliar, evitando así las irritaciones en la piel y en la mucosa por el posible contacto accidental con el producto (Amengual y cols., 2002).

Otro de los efectos adversos del blanqueamiento es que la presencia de peróxido residual y/o radicales, principalmente O_2 , en el esmalte (Titley y cols., 1993; Dishman y cols., 1994; Lai y cols., 2002) o en la dentina (Torneck y cols., 1990; Titley y cols., 1991; Titley y cols., 1993) inhibe la polimerización de las resinas y reduce la fuerza de adhesión de las mismas al diente. Se ha observado que este hecho es independiente de la concentración de peróxido (Kum y cols., 2004) y de la técnica de blanqueamiento vital empleada (Spyrides y cols., 2000; Kaya y Turkun, 2003; Miguel y cols., 2004). Sin embargo, los efectos adversos en la adhesión son reversibles con el tiempo. Diferentes estudios han descrito que dicha adhesión se normaliza entre 24 horas (Dishman y cols., 1994) y 3 semanas después del blanqueamiento (Cavalli y cols., 2001), una vez que se normaliza el nivel de oxigenación de los tejidos (Adibfar y cols., 1992). Es por ello que se recomienda esperar este período de tiempo para realizar obturaciones estéticas en los dientes blanqueados (Dahl y Pallesen, 2003).

Con respecto a su *toxicidad sistémica*, varios estudios muestran que durante la aplicación de agentes blanqueadores en casa, el peróxido se libera dentro de la cavidad oral y, por tanto, posiblemente sea ingerido de forma accidental (Matis y cols., 1999; Matis y cols., 2002; Al-Qunalan y cols., 2003). Por este motivo, podrían

aparecer ulceraciones en la mucosa oral, esofágica y estomacal, acompañada de síntomas como náuseas, vómitos, distensión abdominal y dolor de garganta. No obstante, estos efectos son excepcionales (Dahl y Pallesen, 2003).

Por otra parte, se ha descrito al peróxido de hidrógeno como un potente agente carcinógeno (Waris y Ahsan, 2006). Sin embargo, no existen estudios *in vivo* que demuestren que los bajos niveles de peróxido empleados para el blanqueamiento dental representen riesgo alguno para nuestros pacientes (Minoux y Serfaty, 2008).

I.3.4.6. Limitaciones del tratamiento blanqueador

Dentro de las limitaciones del blanqueamiento dental, debemos distinguir, en primer lugar, aquellas que se derivan de las indicaciones y contraindicaciones de la propia técnica ambulatoria:

- En condiciones normales, los dientes se pueden blanquear entre 2 a 4 tonos de la escala cromática, pero lo hacen de una forma homogénea. En el caso de las tinciones por tetraciclinas, el color de los dientes no se homogeneiza, esto es, las bandas pueden aclararse pero no desaparecen.
- El resultado que se produce con el blanqueamiento dental no es ilimitado, esto es, una vez alcanzado cierto punto de blanqueamiento, el gel ya no tiene efecto.
- Igualmente, el efecto blanqueador tampoco es indefinido: un tiempo después de haber terminado el tratamiento se empieza a producir una ligera recidiva del antiguo tono dental. Aunque esta recidiva se puede prevenir con dosis de recuerdo como mantenimiento.
- El efecto blanqueador no se acelera con poner mayor cantidad de gel en las cubetas o con tenerlas colocadas más tiempo que el recomendado, ya que de esta forma podría acentuarse la sensibilidad dentaria secundaria a este tipo de tratamientos.

Por otra parte, a pesar de la existencia de infinidad de estudios para evaluar la eficacia del agente blanqueador a diferentes concentraciones y formas de aplicación del mismo, y de los resultados satisfactorios obtenidos en la mayoría de estos trabajos, es cierto es que hasta ahora no se ha descrito ningún medio o método objetivo que nos permita predecir el resultado a obtener con el blanqueamiento, es decir, no podemos informar a nuestros pacientes sobre “cómo de blancos se van a quedar sus dientes” tras la aplicación del agente blanqueador.

Con respecto a esta falta de predictibilidad de resultados, Ishikawa-Nagai y cols. publicaron en 2004 (Ishikawa-Nagai y cols., 2004a) un estudio clínico en el que participaron un total de 80 voluntarios, divididos en dos grupos: un grupo formado por 32 sujetos que se inscribieron en el estudio en la facultad de Odontología de Harvard, y otro grupo de 48 personas que se inscribieron al estudio en la escuela universitaria de Odontología en Japón. Simultáneamente, ambos grupos fueron sometidos a un blanqueamiento domiciliario con una concentración de peróxido de carbamida al 10% (Opalescent 10% PF[®] de Ultradent), cuatro horas al día durante dos semanas. Se empleó un espectrofotómetro para medir los dientes (de 1.3 a 2.3) antes y después del blanqueamiento, calculando las coordenadas L^* , a^* y b^* , además de la diferencia de color ΔE^*_{ab} . Mediante un análisis de regresión lineal multivariable, se obtuvieron ecuaciones que predicen el valor de la diferencia de color post-blanqueamiento, a partir de los valores pre-blanqueamiento de las coordenadas L^* , a^* y b^* . Los valores iniciales de b^* y L^* indicaron una correlación de fuerte a moderada con respecto a los valores de ΔE^*_{ab} , mientras que para a^* se obtuvo una correlación débil. La ecuación de regresión múltiple obtenida a partir de los datos colorimétricos correspondientes al grupo de voluntarios de Harvard resultó ser el mejor modelo predictivo. La correlación entre el valor de ΔE^*_{ab} predicho y el observado fue fuerte ($r=0.78$). La validación de esta ecuación en los datos registrados para el grupo de voluntarios de Japón también mostró una fuerte correlación ($r=0.74$). En resumen, este estudio demuestra que es posible predecir los cambios de color producidos tras el blanqueamiento dental cuando se usa un 10% de peróxido de carbamida. Y señala la necesidad de realizar una medición instrumental precisa para evaluar el resultado obtenido con este tipo de tratamientos.

I.4. Modelos predictivos en Biomedicina

I.4.1. Bioestadística

La *bioestadística* se ha convertido en una herramienta indispensable en todos los dominios de las Ciencias de la Salud. En la práctica clínica, existe un gran interés por conseguir modelos de predicción precisos y para ello, con frecuencia se obtienen *modelos de regresión*, por la posibilidad que ofrecen para evaluar el efecto de terceras variables. Dentro de estos modelos, los más utilizados en Medicina son: la *regresión lineal* (donde la variable dependiente o respuesta que se predice es cuantitativa), la *regresión logística* (la variable dependiente es dicotómica) y la *regresión de Cox* (la variable dependiente se caracteriza por tener un comportamiento temporal) (Condés, 2008).

Los modelos de regresión están estrechamente relacionados con el *análisis de la varianza (ANOVA)*, empleado frecuentemente en ensayos o estudios clínicos para estudiar la relación y significación entre las variables que pueden influir en un hecho o acontecimiento dado.

Todas estas técnicas han conocido un auge muy importante en su utilización en Medicina, justificado, en parte, por su fácil disponibilidad al estar incluidas en casi todos los paquetes estadísticos de uso habitual (Trujillano y cols., 2004).

Como bien sabemos, en general en Medicina, y en particular en Odontología, no siempre podemos percibir el grado de incertidumbre implícito en la evolución de una determinada patología o en la respuesta al tratamiento de la misma. De hecho, la secuencia de los eventos y los datos disponibles pueden no ser conocidos con exactitud. Para solventar este inconveniente, y debido a las limitaciones de los modelos de regresión tradicionales para explicar relaciones complejas entre variables, poco a poco se están introduciendo nuevas técnicas computerizadas basadas en la *Inteligencia Artificial*. Estas técnicas, que describimos a continuación, intentan reproducir las habilidades cognitivas del hombre para resolver problemas complejos basándose en observaciones previas.

I.4.2. Técnicas de Inteligencia Artificial

La *Inteligencia Artificial* ha demostrado ser útil cuando la complejidad del proceso a estudiar es muy alta, proporcionando modelos con potentes propiedades predictivas y clasificadoras. Entre sus principales técnicas se encuentran las *redes neuronales artificiales (RNA)* y la *lógica difusa (fuzzy logic)*.

I.4.2.1. Redes Neuronales Artificiales (RNA)

El interés en la Medicina por las *RNA* ha crecido de forma muy rápida en los últimos 20 años. Son cada vez más frecuentes las publicaciones sobre la aplicación de dichas redes en distintas áreas (Moreno y cols., 2001), como por ejemplo, el diagnóstico clínico, la farmacología y la *predicción de resultados*.

Una *RNA* es un algoritmo de cálculo que se basa en un modelo artificial y simplificado del cerebro humano, capaz de adquirir conocimiento y de resolver problemas a través de la experiencia. La idea general consiste en emular la capacidad de aprendizaje del sistema nervioso, de manera que la *RNA* aprenda a identificar un patrón de asociación entre los valores de un conjunto de variables predictoras (*entradas*) y los estados que se consideran dependientes de dichos valores (*salidas*) (Trujillano y cols., 2004). Mediante el proceso de aprendizaje (llamado también entrenamiento) las *RNA* desarrollan la capacidad de predicción de la variable resultado (Trujillano y cols., 2005). Una vez entrenada correctamente, la *RNA* adquiere la capacidad de generalización: es capaz de enfrentarse a nuevos casos (no utilizados en la fase de aprendizaje) y dar resultados correctos (Trujillano y cols., 2004).

Las *RNA* presentan una serie de ventajas sobre otros métodos de predicción, fundamentalmente cuando resulta difícil encontrar las reglas que definen la variable de salida en relación a las variables independientes o predictoras, los datos son imprecisos o contienen perturbaciones estadísticas (ruido), y sobre todo cuando las relaciones entre las variables son no lineales. Las características anteriores se encuentran con frecuencia en Medicina. El cuerpo humano y sus interacciones entre diferentes elementos de su entorno es uno de los sistemas más complejos que existen, siendo la mayoría de estas relaciones no lineales. Las *RNA* pueden

detectar relaciones complejas no lineales entre variables independientes y variables dependientes, por lo que si existe una significativa ausencia de linealidad entre las variables predictoras y las correspondientes salidas, la red ajustará los pesos de conexión en su estructura para reflejar esta ausencia o falta de linealidad. Otra de las ventajas es que aprenden basándose en ejemplos de comportamiento reales. Además, una vez entrenada la red, pueden introducirse fácilmente otros casos nuevos y obtener una predicción rápida (Moreno y cols., 2001).

Sin embargo, a pesar de que las *RNA* han demostrado su utilidad en múltiples campos de investigación también presentan ciertos inconvenientes. No existe un procedimiento sistemático para visualizar el conocimiento “adquirido” por la *RNA* (Moreno y cols., 2001). Esto es, las *RNA* funcionan como una caja negra que realiza una serie de operaciones complejas, generando un resultado esperado, pero sobre el que no podemos dar una explicación directa y comprensible por el experto a partir de las observaciones disponibles. En este sentido surgieron los *modelos neuro-difusos* y la *lógica difusa* para paliar la falta de “transparencia” de las *RNA*.

I.4.2.2. Lógica Difusa

El concepto de *lógica difusa* fue concebido por Lofti A. Zadeh, profesor de la Universidad de California en Berkeley, quien la presentó como una forma de procesar información permitiendo pertenencias parciales a unos conjuntos, llamados *conjunto difusos* (*fuzzy sets*), en contraposición a la lógica convencional y los conjuntos clásicos (*crisp sets*) que sólo permiten dos opciones, la pertenencia o no de un elemento a dichos conjuntos (D’Negri y De Vito, 2006).

La *lógica difusa* es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada imprecisa, ambigua, vaga, con ruido o incompleta. En general, imita cómo una persona toma decisiones basadas en información con un alto grado de imprecisión, diferenciándose así de la lógica convencional, que trabaja con información bien definida y precisa, donde por así decirlo, todo es blanco o negro. En cambio, la *lógica difusa* es una lógica multivaluada, que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones entre sí/no, verdadero/falso, negro/blanco, caliente/frío,

etc. Lo que se busca, mediante el empleo de la *lógica difusa*, es describir y formalizar la realidad, empleando modelos flexibles que interpreten las leyes que rigen el comportamiento humano y las relaciones entre los hombres (D'Negri y De Vito, 2006).

El elemento clave en la utilización de la *lógica difusa* son las *reglas si-entonces (if-then)*, basadas en el concepto de variable lingüística, y que se extraen a partir de la información disponible sobre el problema tratado con ayuda de los expertos biomédicos. La utilización de estas reglas, que denominamos *reglas difusas*, conlleva una serie de ventajas: por un lado, el uso de variables lingüísticas permite modelar el comportamiento de sistemas que no se prestan a su análisis mediante ecuaciones diferenciales; por otro lado, el uso de este tipo de reglas permite explotar la tolerancia a la imprecisión y verdades parciales del mundo real, con el fin de facilitar el tratamiento de aplicaciones reales, obtener soluciones más robustas y, lo que es más importante, con menores costes.

Los sistemas expertos basados en *reglas* que utilizan la *lógica difusa*, han desempeñado una función vital en el avance de soluciones prácticas y sencillas para una gran diversidad de aplicaciones en la Ingeniería y la Ciencia. Debido a su gran importancia en los sistemas de navegación de vehículos espaciales, control de vuelo, control satelital de altitud, control de velocidad en misiles y similares, el área de la *lógica difusa* se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos industriales y de manufactura, facilitando el avance de la *inteligencia artificial* al mismo tiempo que permite cuantificar la vaguedad de los conceptos cualitativos.

La década de 1965-1975 (García-Feijóo y cols., 2003) supuso la aparición de las primeras aplicaciones de la *lógica difusa* en el campo de la Medicina. En 1968, Zadeh (Zadeh, 1969) presentó el primer artículo sobre la posibilidad de desarrollar aplicaciones de conjuntos difusos en Biología. Desde entonces, la *lógica difusa* y demás disciplinas relacionadas con ella, han experimentado una creciente aplicación en el área de la Medicina y la Biología (Accornero y Capozza, 1995; Herrmann, 1995; Ayoubi e Isermann, 1997; Blekas y cols., 1998; Peña-Reyes y Sipper, 1998; Teodorescu y cols., 1999; Torres y Nieto, 2006). Entre estas disciplinas se encuentran los llamados *sistemas neuro-fuzzy*, que combinan un sistema difuso y el trabajo de una red neuronal en una arquitectura homogénea.

Básicamente, se trata de construir un sistema de reglas difusas, cada una de las cuales se obtiene a partir de un proceso de aprendizaje basado en datos y en el cual se utilizan técnicas neuronales, de forma que se obtienen sistemas que manejan información imprecisa de forma comprensible (García-Feijó y cols., 2003).

En el campo de la Odontología, existen pocos estudios que empleen la metodología de la *lógica difusa*. Específicamente, dentro del área de la Periodoncia, encontramos trabajos relacionados con la aplicación de modelos difusos para la caracterización de la superficie dental (Strackeljan y cols., 1997) y, también, para la detección y cuantificación de la placa dental (Kang y cols., 2009).

Hasta ahora, no existen publicaciones acerca de la aplicación de la *lógica difusa* para el estudio del color dental y, más concretamente, para evaluar el cambio cromático producido tras el blanqueamiento dental. Con nuestro trabajo, pretendemos abrir una nueva vía de estudio en el análisis y la predicción de resultados obtenidos tras el tratamiento blanqueador, utilizando como herramienta la *lógica difusa*.

Objetivos

Uno de los problemas clínicos que plantea el blanqueamiento dental es la imposibilidad de conocer *a priori* el cambio cromático que va a observarse en una paciente dado.

Considerando los antecedentes bibliográficos expuestos anteriormente, planteamos los siguientes objetivos:

II.1. Objetivo general

- ❖ Analizar y predecir el cambio cromático que se produce en dientes naturales humanos al aplicar un protocolo blanqueador, mediante el diseño de modelos de inferencia estadística y lógica difusa a partir de medidas espectrorradiométricas.

II.2. Objetivos específicos

- ❖ Medir instrumentalmente el color de dientes naturales humanos antes y después de la aplicación de un protocolo blanqueador con peróxido de carbamida al 20% dos horas al día durante dos semanas.
- ❖ Realizar un análisis descriptivo del cambio cromático observado en el espacio de color CIELAB.
- ❖ Realizar un análisis para estudiar la influencia del cambio de color mediante modelos de regresión lineal.
- ❖ Realizar un estudio para el tratamiento con lógica difusa de los datos experimentales obtenidos, con el objetivo de identificar posibles relaciones no lineales en el conjunto de datos y extraer información relevante para los expertos sobre el proceso analizado.

Material y

Método

Se describen en este capítulo, en primer lugar, la población de estudio que ha participado en el presente trabajo, así como todo el material empleado incluyendo, el material odontológico utilizado tanto en la clínica dental como en el laboratorio, el dispositivo de medida y las condiciones experimentales para el registro de las coordenadas cromáticas de los dientes de los participantes.

En segundo lugar, se describe detalladamente la metodología seguida para el desarrollo del estudio, así como también se presentan los procedimientos matemáticos que han sido aplicados a las medidas experimentales realizadas en el trabajo.

III.1. Material

III.1.1. Población de estudio

Tras obtener la aprobación del Comité de Ética de Investigación Humana de la Universidad de Granada (Anexo 1), se llevó a cabo la selección de los participantes entre voluntarios que, una vez informados de las condiciones del estudio, deseaban participar en el mismo.

Participaron un total de 53 voluntarios, que fueron agrupados en dos grupos atendiendo a la presencia o ausencia de tinción por tetraciclinas. Al grupo de voluntarios que no presentaron tinción alguna, se le denominó *grupo de pacientes normales*, mientras que al grupo de voluntarios que sí presentaron dicha tinción, se le denominó *grupo de pacientes tetraciclínicos*.

Una vez explicados los objetivos del trabajo y los procedimientos no invasivos que se les iba a practicar a cada uno, se obtuvo el consentimiento verbal y por escrito de los participantes (Anexo 2).

La selección de la población de estudio se llevó a cabo atendiendo a los siguientes *criterios de inclusión y exclusión*:

III.1.1.1. Grupo 1: Pacientes Normales

En este grupo, contamos con la colaboración de un total de 37 voluntarios (20 hombres y 17 mujeres) con una media de edad de 42,8 años.

➤ *Criterios de inclusión:*

- Estar presentes incisivos y caninos superiores (1.3 a 2.3), vitales y sanos.

➤ *Criterios de exclusión:*

- Alergia conocida a alguno de los componentes del agente blanqueador usado.

- Presencia de restauraciones (obturaciones o coronas) en los dientes objeto de estudio.
- Presencia de dientes en mesiorrotación o distorrotación que pueda interferir con la medición cromática.
- Discoloraciones intrínsecas (p.e tetraciclina, fluorosis), o anomalías estructurales del diente (p.e. dentinogénesis o amelogénesis imperfecta).
- Historia previa de blanqueamiento dental.
- Dispositivos ortodóncicos en el grupo antero-superior.
- Mala higiene bucodental.
- Enfermedad periodontal no tratada.
- Fumadores.
- Hipersensibilidad dentinaria.
- Embarazo o lactancia.

III.1.1.2. Grupo 2: Pacientes Tetraciclínicos

En este grupo, colaboraron un total de 16 voluntarios (11 hombres y 5 mujeres) con una media de edad de 38,9 años.

Los *criterios de inclusión y exclusión* fueron los mismos que para el grupo anterior, salvo que, en este caso, quedaron incluidos aquellos voluntarios que presentaban una discoloración intrínseca causada por tetraciclinas.

III.1.2. Material Odontológico

A continuación se describen los materiales dentales empleados para la realización del estudio.

III.1.2.1. Material y equipamiento dentales utilizados en la clínica dental

Para la preparación de los participantes se utilizaron las instalaciones clínicas y de laboratorio de la Facultad de Odontología de la Universidad de Granada (UGR), empleando el siguiente material y equipamiento dentales:

III.1.2.1.1. Equipo dental: tanto las revisiones como las profilaxis dentales se llevaron a cabo en un sillón dental Kavo.

III.1.2.1.2. Material de exploración: a cada participante se le practicó una completa revisión bucodental, para la que se empleó:

- Espejo dental: se utilizaron espejos de mano MIK5/12 de Hu-Friedy.
- Sonda dental: también se emplearon para las revisiones sondas de exploración Extu17/23 de Hu-Friedy.
- Guantes de látex y mascarillas: para el examen intraoral, se usaron guantes de látex y mascarillas desechables de Medicaline.

III.1.2.1.3. Material para profilaxis: para la profilaxis buco-dental se empleó:

- Ultrasonido: la limpieza dental se realizó mediante un ultrasonido modelo Piezon[®] de EMS.
- Contraángulo: el pulido de las piezas dentales tras la profilaxis se llevó a cabo mediante un contraángulo convencional de la marca Kavo.
- Pasta de pulir: para el pulido de los dientes se usó pasta de pulir Sultan Topex de Prep&Polish[®].
- Cepillos de profilaxis: para el pulido también se usaron cepillos de profilaxis 10/ n^º 835 RA/ PA de Hawe-Neos Dental.
- Aspiradores: para aspirar el agua del ultrasonido y la saliva del paciente durante la limpieza dental, se usaron eyectores transparentes flexibles de Medicaline.
- Baberos: para evitar que el paciente se mojase durante la profilaxis, se usaron baberos de plástico Monoart-Euronda.
- Vasos de plástico: para que los pacientes se enjuagasen tras la limpieza, se usaron vasos de plástico desechables de Medicaline.

III.1.2.1.4. Material para impresiones y modelos de trabajo: a cada paciente se le tomaron tres impresiones, una inferior y superior para confeccionar las férulas para el blanqueamiento dental y otra impresión de la arcada superior para confeccionar una férula posicionadora. Para esto se empleó:

- Cubetas individuales: los registros con los que luego se fabricaron las férulas posicionadoras y las de blanqueamiento se tomaron con cubetas de impresión de plástico rígido de Coltene.
- Alginato: para tomar estos registros se usó, como material de impresión, alginato Cavex CA 37 (Cavex Holland BV).
- Taza y espátula para alginato: para hacer la mezcla del alginato se utilizó una taza de goma y espátula plástica Zhermack.
- Escayola: las impresiones se vaciaron en yeso duro tipo IV Vel-Mix (Stone-Kerr), para así obtener los modelos de trabajo sobre los que se confeccionaron las férulas posicionadoras y las de blanqueamiento.
- Taza y espátula para yeso: para la mezcla del yeso se usó una taza de goma blanda y espátula metálica Mestra.

III.1.2.1.5. Material para confeccionar las férulas posicionadoras y de blanqueamiento:

- Planchas para férulas: para confeccionar las férulas posicionadoras se emplearon unas planchas de acrílico rígidas y transparentes Essix[®] tipo A de Orhtospain, y para las férulas de blanqueamiento se usaron las planchas Sof-Tray[®] Sheets de 0.060" y 1,5mm de grosor de Ultradent.
- Laca de uñas de marca convencional.
- Máquina de vacío: para fabricar ambos tipos de férulas, se utilizó una máquina moldeadora de planchas termoplásticas al vacío Proform[®].
- Tijeras de marca convencional para recortar las planchas del blanqueamiento.

- Turbina de la casa Kavo y fresas de diamante: para recortar y perforar las férulas posicionadoras.
- Pieza de mano Kavo y discos de fieltro para el pulido de las férulas.

III.1.2.1.6. Material para el blanqueamiento dental: como agente blanqueador empleamos el kit de Opalescente® PF™ de la casa Ultradent, que se define como un sistema de blanqueamiento dental domiciliario, supervisado y controlado por el dentista, dispensado en jeringas que contienen un gel transparente, viscoso, adhesivo y de diferentes sabores (p.e. menta, melón) de peróxido de carbamida (pH 6.5) al 10, 15 o 20%.

Dentro de las diferentes variedades de este producto disponibles comercialmente, para el estudio clínico utilizamos el Opalescente® PF™, que contiene como principio activo un gel de peróxido de carbamida al 20%, además de nitrato potásico al 0.5% e ión fluoruro al 0.11% (1100 ppm) y con sabor a melón.



Figura III.1. Kit de blanqueamiento entregado a todos los pacientes.

III.1.2.2. Material dental utilizado en el laboratorio

La medición del color dental *in vivo* se llevó a cabo en uno de los laboratorios del Departamento de Óptica de la Facultad de Ciencias de la UGR. Para facilitar dicho registro, en este caso como material odontológico únicamente se emplearon retractores labiales de plástico esterilizables Spandex-Hager Werken.

III.1.3. Dispositivos de medida del color dental

A continuación describiremos los instrumentos y dispositivos utilizados en el laboratorio del Departamento de Óptica de la UGR para medir el color dental de los participantes.

III.1.3.1. *Mentonera*

Como dispositivo para la fijación del paciente y para que las medidas se tomasen con la mayor repetibilidad posible, se utilizó una *mentonera* (figura III.2.) para que el paciente tuviese la cabeza inmovilizada durante la medición del color (Hasegawa y cols., 2000b).



Figura III.2. Mentonera.

III.1.3.2. *Fuente de luz*

La capacidad de analizar correctamente las características cromáticas de los dientes puede resultar más fácil si se toma en condiciones de iluminación ideal y controladas. Como se comentó en el capítulo anterior, para dicha aplicación, la CIE ha establecido como patrón internacional de iluminación la luz D65 (6500 °K) que se corresponde con la luz diurna del cielo septentrional del Hemisferio Norte y que coincide con el color neutro percibido por el ojo humano como blanco. Esta temperatura cromática es la más constante a lo largo del día y de las estaciones.

Para medir el color dental de los pacientes con el espectrorradiómetro y en condiciones estándar de iluminación, evitando así el fenómeno del metamerismo,

utilizamos la lámpara Demetron Shade Light[®] de la casa Kerr (figura III.3.). Este aparato portátil, consiste en una lámpara fluorescente de cátodo frío con tres luminóforos RGB (rojo, verde y azul) que se corresponden con los tres colores primarios de los receptores cromáticos (conos) del ojo humano. Esta fuente de luz consta de un tubo de vidrio sellado de unos milímetros de diámetro con un electrodo en cada extremo. El tubo contiene una pequeña cantidad de mercurio a baja presión. Cuando se aplica una tensión elevada entre los extremos, el mercurio se excita y se emite radiación ultravioleta. La pared interna del tubo está revestida por los tres luminóforos, que emiten luz blanca al ser expuestos a dicha radiación ultravioleta.

Es, por tanto, una luz D65, portátil y sin cable, con un espectro de color más completo que las lámparas convencionales de tungsteno/halógena, permitiendo mejorar la resolución de los colores en la clínica tanto para la toma del color dental como en el proceso de igualar el color del material restaurador con el del diente natural (Belvedere, 2005).

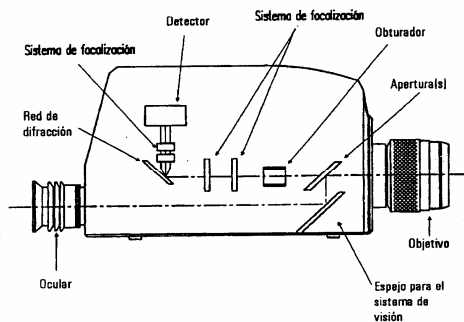


Figura III.3. Shade Light[®] de Kerr.

III.1.3.3. *Espectrorradiómetro*

Para registrar de forma objetiva las coordenadas cromáticas de los dientes de los participantes utilizamos el espectrorradiómetro SpectraScan modelo PR-704[®] de Photo Research con su correspondiente software (figura III.4.). Este aparato consta de un cabezal óptico con un espejo de apertura tipo Pritchard que dirige la radiación

óptica incidente hacia una red de difracción o hacia el ocular. A continuación de la red de difracción se halla una matriz lineal de fotodiodos detectores que tiene 256 elementos o pixels, enfriados termoeléctricamente a 0°C en una cámara sellada para eliminar virtualmente la contaminación por el polvo y las fluctuaciones de temperatura, estando además presurizada con nitrógeno para prevenir la condensación (figura III.5.).



Figuras III.4. y III.5. Espectrorradiómetro SpectraScan PR-704/PC® de Photo Research y esquema de sus componentes, respectivamente.

Teniendo en cuenta el rango del espectro de medida (380-780 nm), cada píxel mide en incrementos de 1.6nm, aunque los resultados se expresan en incrementos de 2nm por conveniencia. Antes de realizar la medición, cada detector se recarga eléctricamente. Dicha carga disminuye al incidir radiación sobre el elemento y se traduce en una señal analógica que transmite a la tarjeta controladora instalada en el ordenador, a través del cable que conecta el espectrorradiómetro con éste. Un convertidor analógico digital de 12 bits en la tarjeta transforma la señal analógica en su equivalente digital para realizar los cálculos adecuados.

En cuanto al error asociado a las medidas, el fabricante indica que, en el caso de medidas fotométricas absolutas, es menor de 4.1% y si son relativas, del 1 al 2%. En cuanto al error asociado para coordenadas de cromaticidad (x, y) se indica un ± 0.003 . Este espectrorradiómetro dispone de un software apropiado (Spectra-view 2.10), desarrollado por Photo-Research y que incluye, entre otras opciones, las

siguientes posibilidades:

- Cálculo de luminancia, iluminancia, radiancia, irradiancia y temperatura de color.
- Cálculo de los valores triestímulo X, Y, Z coordenadas de cromaticidad en los sistemas CIE1931, CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) y CIE 1976 (L^* , u^* , v^*), longitud de onda dominante y pureza colorimétrica.

Al medir el color, para calcular las coordenadas en el sistema CIELAB, el blanco de referencia ha de medirse bajo las mismas condiciones que la muestra correspondiente. En nuestro caso, el blanco de referencia utilizado es el proporcionado por el fabricante del espectroradiómetro. Se trata de una superficie normal de sulfato de bario presurizado de dimensión 50 x 50 mm, situada en una caja construida para evitar todo contacto con la luz o de otros agentes exteriores, lo que garantiza una buena conservación. La medida espectrorradiométrica de este blanco de referencia proporciona información sobre la fuente de luz utilizada. Los valores triestímulo obtenidos, como se ha comentado, son indispensables para el cálculo de los datos CIELAB de las muestras.

III.1.3.4. Guía Vitapan Classical[®]

Se realizó también una medición subjetiva del color dental de los participantes empleando para ello la guía de color Vitapan Classical[®] de la casa Vita ordenada en orden decreciente de luminosidad.

Para la caracterización colorimétrica de la guía, se procedió a la medición espectrorradiométrica de cada una de las 16 tablillas en las mismas condiciones experimentales de iluminación.

III.1.4. Soporte informático

- Para el tratamiento de las coordenadas cromáticas obtenidas con el espectrorradiómetro SpectraScan PR-704[®], se han empleado hojas de cálculo tipo Excel y el programa informático Origin 6.1[®].

- Para realizar el análisis de la varianza ANOVA se empleó el programa Statgraphics®.
- Para la obtención de modelos de regresión lineales uni y multivariantes empleamos el software matemático MATLAB®.
- Para la aplicación de la lógica difusa se empleó el toolbox de fuzzy logic de MATLAB®.

III.2. Método

La preparación de los pacientes y las mediciones experimentales de los dientes objeto de estudio se llevaron a cabo en dos fases, que se exponen a continuación. Completamos este apartado con una tercera fase donde se explica el método empleado para el análisis de los resultados colorimétricos obtenidos.

III.2.1. Metodología Odontológica

La selección y preparación de los pacientes se realizó en las instalaciones clínicas y de laboratorio de la Facultad de Odontología de la UGR.

En primer lugar, se citaron a los voluntarios para hacerles una completa revisión bucodental, verificando que cumplieren los criterios de inclusión/exclusión establecidos en el estudio para ambos grupos experimentales. Se rellenaron también las hojas correspondientes a la historia clínica y el odontograma de cada uno de los participantes (Anexo 3).

Una vez explicados los objetivos del estudio y tras la obtención del consentimiento de los participantes, tanto verbal como por escrito, se llevó a cabo la correspondiente profilaxis dental y toma de impresiones. En esta misma cita, a cada

voluntario se le entregó un cuestionario con preguntas relacionadas con los antecedentes de interés para el estudio (tabaquismo, hábitos alimenticios, uso de colutorio con clorhexidina, etc) (Anexo 4).

A cada uno de estos antecedentes, también llamados *variables exógenas*, junto con la *edad* y el *sexo* de los participantes, se le asignó un código numérico para simplificar el estudio de estos antecedentes en el capítulo de resultados. La figura III.6. muestra los códigos numéricos de dichas variables estudiadas.

CÓDIGOS DE LA ENCUESTA				
SEXO				
Sexo	Mujer	Hombre		
Código	0	1		
EDAD: la que le corresponde al paciente				
TABACO				
Respuesta	No	Ocasionalmente	Sí, menos de 5 cigarrillos/día	Sí, más de 5 cigarrillos/día
Código	0	1	2	3
CAFÉ/TÉ/INFUSIONES				
Respuesta	No	Sí, menos de 3 veces/día	Sí, más de 3 veces/día	
Código	0	1	2	
BEBIDAS CARBÓNICAS/ISOTÓNICAS				
Respuesta	No	Sí, menos de 3 veces/día	Sí, más de 3 veces/día	
Código	0	1	2	
VINO TINTO				
Respuesta	No	Sí, 1 copa/día	Sí, 2 o más copas/día	
Código	0	1	2	
ALIMENTOS QUE TIÑEN LOS DIENTES (<i>zanahorias, remolacha, alcachofas, espinacas, chocolate y/o cacao, y fresas y/o frutas del bosque</i>): se da un valor del 1 a 6 dependiendo del número de alimentos que señala el paciente (ej: 0= no consume ninguno de los alimentos de la lista, 1= si toma uno de los alimentos, 2= si toma dos de éstos, ...)				
COLUTORIOS				
Respuesta	No	Sí, con clorhexidina		
Código	0	2		

Figura III.6. Relación y códigos numéricos de las *variables exógenas* estudiadas.

Las impresiones de alginato fueron vaciadas en escayola en el laboratorio de sudio de la misma facultad. Una vez obtenidos los modelos de escayola a partir de las mismas, se confeccionaron tanto las férulas de blanqueamiento como las férulas posicionadoras con las planchas de acrílico correspondientes y la máquina de vacío.

Sobre los modelos que se utilizaron para la confección de las férulas de blanqueamiento, se recubrió la superficie vestibular de cada diente con una laca de uñas de marca convencional creando así un pequeño reservorio para el gel de blanqueamiento. La capa del espaciador se extendió hasta 1 mm de las líneas ángulos y el margen gingival, tal y como recomienda el fabricante del producto blanqueador (figura III.7.).



Figuras III.7. y III.8. Modelos pintados con el espaciador y férula posicionadora, respectivamente.

Como se muestra en la figura III.8., las férulas posicionadoras se confeccionaron de forma que sólo abarcasen los dientes que se iban a medir, es decir, de canino a canino superior (de 1.3 a 2.3). El objetivo de su fabricación no es otro que la necesidad de que los diferentes registros de color con el espectrorradiómetro SpectraScan PR-704[®] se realicen siempre en el mismo punto o zona del diente (Douglas, 1997; Shimada y cols., 2004). Dada la convexidad de la cara vestibular de los dientes anteriores, se tomó el color en la zona central (tercio medio) equidistante mesiodistalmente, ya que es aquí donde el diente muestra una superficie más plana y, por tanto, con un mejor ángulo de reflexión de la luz (Amengual y cols., 2005).

A cada férula posicionadora se le dibujó una circunferencia de unos 3mm de diámetro situada en el tercio medio vestibular de cada uno de los dientes que se

iban a medir. Con una fresa de diamante se perforó cada circunferencia y luego se pulieron las mismas con un disco de fieltro.

III.2.2. Metodología Colorimétrica

Una vez terminada la fase anterior, se citó a los participantes en el plazo de 48 horas en el Departamento de Óptica de la Facultad de Ciencias de la UGR, para llevar a cabo la primera medición del color dental de los mismos. En esta misma cita, cada participante recibió un kit de blanqueamiento con dos jeringas de 1.2 ml cada una y se le instruyó para la correcta colocación del producto blanqueador en casa. Se entregaron también unas hojas con explicaciones sobre la aplicación del producto, el cuidado buco-dental y de las férulas así como consejos dietéticos durante el tratamiento blanqueador (Anexo 5).

Según el fabricante, el gel de peróxido de carbamida Opalescence blanquea activamente unas 8-10 horas durante la noche o unas 4-6 horas durante el día. Por comodidad para el paciente y por ser una pauta extendida en la literatura, establecimos como régimen de tratamiento una pauta de blanqueamiento de unas 2 horas al día durante dos semanas (Haywood, 1997; Sulieman, 2005; Hasson y cols., 2006).

En esta segunda fase del estudio, se realizaron mediciones tanto *objetiva* como *subjetivamente* en el primer día (a las 48 horas de la profilaxis dental), a los 7 días y a los 15 días, tras finalizar el tratamiento blanqueador. Las mediciones realizadas a la semana de iniciar el tratamiento, a los 7 días, se realizaron para controlar la evolución del blanqueamiento y la aparición de los posibles efectos secundarios del mismo.

Para el *registro objetivo* del color dental con el espectrorradiómetro SpectraScan modelo PR-704[®], se colocaron la férula posicionadora correspondiente y un retractor labial a cada paciente, y se les hizo sentarse en una silla apoyando el rostro en la mentonera. Dado que este aparato no incorpora ninguna fuente de luz, se utilizó la lámpara Shade Light[®], de forma que todas las

mediciones, tres por cada diente, se tomaron en condiciones estándar de iluminación (figura III.9.).



Figura III.9. Toma de color con el espectrorradiómetro SpectraScan PR-704® y la lámpara Shade Light®.

Para la *medición subjetiva* del color empleamos la guía de color Vitapan Classical® comparando las tablillas de la guía con los dientes objeto de estudio. Para realizar estas medidas, el paciente siguió posicionado en la misma silla, apoyando la cabeza en la mentonera, con la férula posicionadora puesta y portando la lámpara Shade Light®. El observador fue el mismo en todas las mediciones, registrando los datos en la ficha del paciente (Anexo 3).

Posteriormente, estas tablillas de la guía de color fueron medidas con el espectrorradiómetro y la lámpara Shade Light®, obteniendo así las coordenadas colorimétricas en CIELAB. Para simplificar la terminología empleada a lo largo de la presente Memoria, a cada tablilla se le llamó *tono VITA*, por ejemplo *tono VITA B1*, *tono VITA A1*, etc.

Todas las mediciones durante las dos semanas que duró el estudio clínico se realizaron siempre en las mismas condiciones de observación e iluminación.

III.2.3. Método de análisis de los resultados

Se expone a continuación los fundamentos matemáticos de la metodología empleada en este trabajo para el análisis de los resultados obtenidos antes y después del tratamiento blanqueador.

III.2.3.1. Fórmulas de diferencia de color e índices de blanqueamiento

En 1976 la CIE recomendó el uso de CIELAB como sistema de especificación del color, con su correspondiente fórmula de diferencia de color asociada (ΔE^*_{ab}), principalmente por el deseo de promover una uniformidad en la práctica de la medida del color.

Por definición, la diferencia de color ΔE^*_{ab} es la distancia euclídea entre dos puntos situados en este espacio tridimensional y cuya expresión es la siguiente:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{I.3.})$$

donde ΔL^* , por ejemplo, denota la diferencia en L^* entre 2 muestras.

Podemos establecer un grado o *índice de blanqueamiento* para una superficie dada midiendo sus coordenadas de color L^* , a^* y b^* en el espacio CIELAB, y luego calcular su diferencia de color con respecto a un blanco modelo, cuyas coordenadas serán $L^*=100$, $a^*=0$ y $b^*=0$ ($100,0,0$) usando la siguiente expresión (García y cols., 1993):

$$EW^* = \sqrt{(100 - L^*)^2 + (0 - a^*)^2 + (0 - b^*)^2} \quad (\text{III.1.})$$

La fórmula de este índice para las mediciones antes (i) y después (j) del blanqueamiento son las siguientes:

$$EW_i^* = \sqrt{(100 - L_i^*)^2 + (0 - a_i^*)^2 + (0 - b_i^*)^2} \quad (\text{III.2.})$$

$$EW_f^* = \sqrt{(100 - L_f^*)^2 + (0 - a_f^*)^2 + (0 - b_f^*)^2} \quad (\text{III.3.})$$

Un menor valor de la medida EW^* muestra una menor distancia al blanco modelo $(100,0,0)$, esto es, un diente más acromático.

Como ya se comentó en el primer capítulo, otro índice que también se emplea en Odontología para predecir y evaluar los cambios en la blancura de los dientes es el *índice WIO* (Luo y cols., 2007; Luo y cols., 2005), cuya expresión viene dada de la siguiente forma:

$$WIO = Y + 1075.012(x_n - x) + 145.516(y_n - y) \quad (\text{I.12.})$$

Como veremos en el capítulo de resultados, para cada diente se obtuvieron los valores de las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* , además del croma C^* y el ángulo de tono h^o . También se calculó la diferencia de color ΔE_{ab}^* y los índices de blanqueamiento EW^* y WIO .

III.2.3.2. Regresión y correlación lineal

Muchos de los trabajos de investigación en las Ciencias de la Salud se centran en la determinación de la relación existente entre dos variables. La *regresión* y la *correlación lineal*, permiten comprobar si dos variables cuantitativas se relacionan o son dependientes entre si.

De un modo general se dice que en una muestra de n valores $(x_i; y_i)$ existe regresión lineal de los valores de una variable con respecto a los de la otra cuando hay alguna línea, llamada *línea de regresión*, que se ajusta más o menos claramente a su nube de puntos (diagrama de dispersión de la distribución de los datos). La variable cuya variabilidad queremos estudiar es la *variable dependiente* o *respuesta* (y) y la variable en función de la cual varía es la *variable independiente*,

también llamada *variable predictora* (x). La ecuación para esta recta o línea de regresión sería:

$$y = a + bx \quad \text{(III.4.)}$$

donde a es la ordenada en el origen, es decir, el valor de y cuando x vale 0, y b la pendiente de la recta, que representa el incremento que experimenta el valor de y por cada unidad que se incrementa el valor de x .

El objeto del análisis de regresión lineal, por tanto, es *predecir* los valores de la variable respuesta en función de los valores de la variable independiente. Pero la mayoría de los fenómenos biológicos dependen de más de una variable predictora (x_1, x_2, \dots, x_n) y nos interesa conocer la influencia de cada una de ellas de forma independiente, de ahí que en la investigación en Medicina debamos emplear la *regresión lineal multivariable*.

El análisis de *correlación lineal* determina el grado de relación entre las variables que se estudian para determinar en qué medida una ecuación lineal describe o explica de una forma adecuada la relación entre las variables.

III.2.3.2.1. Recta de regresión de mínimos cuadrados

El procedimiento más objetivo para ajustar una recta a un conjunto de datos presentados en una nube de puntos, ó diagrama de dispersión, se conoce como "*método de los mínimos cuadrados*". A la recta que se obtiene se le conoce como "*recta de regresión de mínimos cuadrados de y sobre x* " y es aquella que minimiza un cierto error, considerando a x como variable explicativa o independiente y a y como la variable explicada o dependiente.

Sea $y = a + bx$ una recta arbitraria. Para cada dato de x , es decir, para cada x_i del conjunto de datos tenemos emparejado un dato de y llamado y_i (valor observado ó efectivo), pero también tenemos el valor de sustituir la x_i en la ecuación de la recta, a la que llamaremos \hat{y}_i (valor estimado):

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad \text{(III.5.)}$$

Cuando se toma el dato x_i , el error que vamos a considerar es el que se comete al elegir \hat{y}_i (valor estimado) en lugar del verdadero y_i (valor observado ó efectivo). Se denota con e_i y vale:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad \text{(III.6.)}$$

Esos errores, también llamados *residuos*, pueden ser positivos o negativos, y lo que se hace es escoger la recta que minimice la suma de los cuadrados de todos esos errores, que es la misma que la que minimiza la varianza de los errores.

Usando técnicas de derivación se llega a que, de todas las rectas $y = a + bx$, con a y b números arbitrarios, la recta que minimiza el error elegido es aquella que cumple:

$$b = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad \text{y} \quad a = \bar{y} - \frac{S_{xy}}{S_x^2} \cdot \bar{x} \quad \text{(III.7.)}$$

donde S_{xy} es la covarianza entre las variables x e y , S_x^2 es la varianza de x , \bar{y} es el valor medio de y , y \bar{x} el valor medio de x .

Así pues, sustituyendo en $\hat{y}_i = a + bx_i$, la ecuación de la *recta de regresión de mínimos cuadrados de y sobre x* sería:

$$\hat{y}_i = \left(\bar{y} - \frac{S_{xy}}{S_x^2} \cdot \bar{x} \right) + \left(\frac{S_{xy}}{S_x^2} \right) \cdot x_i \quad \text{(III.8.)}$$

En el caso multivariable, el valor estimado de la variable dependiente se obtendría de según la ecuación:

$$\hat{y}_i = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad \text{(III.9.)}$$

donde los coeficientes a y b (b_1, b_2, \dots, b_n) se calcularían de forma similar que para el caso univariable, esto es, utilizando derivación y resolviendo el sistema de ecuaciones lineales resultante.

III.2.3.2.2. Coeficientes de correlación lineal y de determinación

El *coeficiente de correlación lineal* (r) mide la fuerza de la relación entre las variables estudiadas x y y . Tiene el signo que tiene la pendiente de la recta y su valor estará entre 1 y -1. Su valor absoluto indica la fuerza, y su signo el sentido de ella. A mayor magnitud de su valor absoluto, mayor fuerza. Esto es, cuanto más se acerque a 1 mejor es la relación lineal entre las variables; un valor de 0 nos indica que no hay relación lineal entre ellas, son independientes entre si, aunque es posible la existencia de una relación no lineal. Se calcula de la siguiente forma:

$$r = \pm \sqrt{\frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{(III.10.)}$$

donde y_i es el valor observado de y , \hat{y}_i es el valor estimado de y , \bar{y} es el valor medio de y , $\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ es la variación explicada de y , y $\sum (y_i - \bar{y})^2$ es la variación total de y .

Cuanto más aplastada es una nube de puntos (salvo que sea paralela al eje x ó y , en cuyo caso, es nula), más grande es la correlación (en valor absoluto).

El *coeficiente de determinación* (R^2) mide o interpreta la cantidad relativa de la variación que ha sido explicada por la recta de regresión, es decir, la proporción que representa la variación explicada de la variación total. Su expresión viene dada de la siguiente forma:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{(III.11.)}$$

donde $\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ es la variación explicada de y , $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ es la variación no explicada de y , y $\sum (y_i - \bar{y})^2$ es la variación total de y .

También se le suele llamar *calidad del ajuste*, porque valora lo cerca que está la nube de puntos de la recta de regresión, o dicho de otro modo, lo ajustada que está la nube de puntos a la recta de regresión. Su valor absoluto siempre estará entre 0 y 1, aunque a veces esta proporción se expresa como porcentaje. Cuanto más se acerque al 100%, mayor será la calidad del ajuste.

El coeficiente de determinación se obtiene también a partir del coeficiente de correlación elevando este último al cuadrado, tanto para el caso de regresión simple, como para el caso de regresión multivariable (llamándose en este último caso el coeficiente de correlación, *coeficiente de correlación múltiple*).

III.2.3.2.3. Error estándar en la estimación

El *error estándar* en la estimación, designado por S_{y_z} , mide la disparidad promedio entre los valores observados de y (y_i) y los valores estimados de y (\hat{y}_i). Describe cómo de precisa es la predicción de y en función de x o qué inexacta puede ser la estimación. Es el mismo concepto que la desviación estándar, aunque ésta mide la dispersión alrededor de la media y el error estándar mide la dispersión alrededor de la línea de regresión.

Su expresión viene dada por la siguiente fórmula:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad \text{(III.12.)}$$

A mayor número de datos (n), el error estándar será más pequeño.

III.2.3.3. Análisis de la varianza ANOVA

La técnica del análisis de la varianza ANOVA es una de las técnicas más utilizadas en los análisis de datos de los diseños experimentales y sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar. Se utiliza cuando queremos contrastar más de dos medias, por lo que puede verse como una extensión de la Prueba T para los valores medios de más de dos poblaciones.

A la variable categórica (nominal u ordinal) que define los grupos que deseamos comparar la llamamos *variable independiente* o *factor*. A la variable cuantitativa (de intervalo o razón) en la que deseamos comparar los grupos la llamamos *variable dependiente*.

El ANOVA es un método muy flexible que permite construir modelos estadísticos para el análisis de los datos experimentales cuyo valor ha sido constatado en muy diversas circunstancias. Básicamente es un procedimiento que permite dividir la varianza de la *variable dependiente* en dos o más componentes, cada uno de los cuales puede ser atribuido a una fuente (variable o factor) identificable (*variable independiente*).

Los modelos que permiten construir el ANOVA pueden ser reducidos a la siguiente forma:

$$(\text{Valor observado}) = \Sigma(\text{efectos atribuibles}) + \Sigma(\text{efectos no atribuibles o residuales})$$

El valor observado se refiere al que se obtiene en la *variable dependiente*. Los efectos atribuibles son parámetros o variables aleatorias que son el resultado de cambios en las *variables independientes* y, por tanto, atribuibles a ellas. Aquellos efectos no atribuibles a ningún factor controlado se denominan *efectos residuales* o *variables aleatorias residuales*.

Para usar el modelo de ANOVA debe poder suponerse que son válidas una serie de condiciones:

- Las distintas poblaciones deben tener una distribución normal y con varianzas similares (*homocedasticidad*).
- Los tamaños de las poblaciones no deben ser muy dispares. Esta condición en realidad no es estrictamente necesaria, y además es controlable al realizar el experimento.

Si se dan estas condiciones, el modelo de ANOVA traduce la hipótesis nula de que en todos los grupos se obtienen valores similares de las variables por una condición equivalente: que las medidas (como parámetro) en los diferentes grupos son iguales.

La hipótesis que se pone a prueba en el ANOVA de un factor es que las medias poblacionales (las medias de la *variable dependiente* en cada nivel de la *variable independiente*) son iguales. Si las medias poblacionales son iguales, eso significa que los grupos no difieren en la *variable dependiente* y que, en consecuencia, la *variable independiente* es independiente de la *variable dependiente*.

La estrategia para poner a prueba la hipótesis de igualdad de medias consiste en obtener un estadístico, llamado F , que refleja el grado de parecido existente entre las medias que se están comparando. El numerador del estadístico F es una estimación de la varianza poblacional basada en la variabilidad existente entre las medias de cada grupo. El denominador del estadístico F es también una estimación de la varianza poblacional, pero basada en la variabilidad existente dentro de cada grupo:

$\sigma_2^2 = S_j^2$ (j se refiere a los distintos grupos o niveles del factor):

$$F = \sigma_1^2 / \sigma_2^2 = n \sigma_Y^2 / S_j^2 \quad \text{(III.13.)}$$

Si el nivel crítico asociado al estadístico F (es decir, si la probabilidad de obtener valores como el obtenido o mayores) es menor que 0.05, rechazamos la

hipótesis de igualdad de medias y concluiremos que no todas las medias poblacionales comparadas son iguales. En caso contrario, no podremos rechazar la hipótesis de igualdad y no podremos afirmar que los grupos comparados difieran en sus promedios poblacionales.

En nuestro caso, el ANOVA nos va a permitir comprobar la significancia de variables exógenas, como por ejemplo la edad, en el cambio cromático dental producido tras la aplicación de un tratamiento blanqueador.

III.2.3.4. Lógica Difusa

La *lógica difusa*, o *teoría de conjuntos difusos*, es un paradigma de aprendizaje automático introducido por Zadeh en 1965 (Zadeh, 1965) siendo también uno de los pilares esenciales de la Inteligencia Artificial. Permite representar y tratar de forma matemática conceptos o conjuntos imprecisos, tales como por ejemplo: “días fríos”, “meses calurosos”, “personas altas”, etc. Desde su aparición, su aplicación en todas las áreas no ha hecho más que crecer, debido a dicha habilidad para tratar con información imprecisa e incertidumbre. Su operativa interna pretende imitar a la del cerebro humano en el tratamiento de este tipo de información.

Sus aplicaciones principales son el control de sistemas y el modelado de fenómenos físicos. En este sentido, existe una interconexión importante con las *redes neuronales*, con las que tiene equivalencia en algunas tipologías y bajo ciertas condiciones, denominándose, en esos casos, *sistemas neuro-difusos*.

Los conceptos y metodología explicadas aquí pueden ampliarse en la bibliografía introductoria a los *sistemas difusos* presente en la literatura (Buckley, 1992; Driankov y cols., 1993; Haykin, 1998; Martín Del Brio y Sanz, 2006). Deseamos resaltar también, que la introducción que se presenta ahora supone una simplificación drástica de los conceptos y formulación asociados a la *teoría de conjuntos difusos*. Se introduce a nivel básico la operativa de un *modelo difuso tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK)* (Takagi y Sugeno, 1985), con entradas numéricas, utilización de *T-norma producto* para conjunción e implicación, y con un conjunto

prefijado de *reglas difusas* para el modelado automático de un conjunto de datos. Este tipo de modelo se utiliza ampliamente en la literatura científica debido a su facilidad de uso, a que son aproximadores universales (cualquier sistema real puede aproximarse tan bien como se desee mediante un *sistema difuso tipo TSK* bajo ciertas condiciones básicas) (Castro, 1995) y a la posibilidad que ofrecen de obtener un modelo interpretable por un experto, con la posibilidad de extraer conocimiento sobre el funcionamiento del modelo físico subyacente.

A continuación, primeramente, introduciremos el concepto de *conjunto difuso* para luego, en secciones posteriores, introducir los conceptos de *regla difusa* e *inferencia difusa*, en concreto en el *modelo TSK* utilizado en este estudio. Finalmente se introducirá la *optimización de un modelo difuso tipo TSK* para el modelado de un conjunto de datos.

III.2.3.4.1. Conjunto difuso y Función de pertenencia.

El concepto clave en la lógica difusa es el de *conjunto difuso*, el cual viene definido normalmente por una *función de pertenencia*. Si X es una colección de objetos denotados genéricamente por x , un conjunto difuso A en el universo de trabajo X se define por un conjunto de pares ordenados en la forma: $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$, donde $\mu_A(x)$ es la *función de pertenencia* de un elemento x al conjunto A . La característica más importante de esta función es que puede tomar cualquier valor dentro del intervalo normalizado $[0,1]$.

La singularidad de la lógica difusa respecto de la lógica clásica es que la pertenencia de una muestra x a un conjunto A no es “sí” o “no” (que podemos denominar valores $\mu_A(x) = 0$ y $\mu_A(x) = 1$, respectivamente), sino que considera la incertidumbre que puede ocurrir al valorar dicha pertenencia, como sucede con incontables casos de la realidad (persona alta, temperatura baja, etc.). Se observa claramente la semejanza de estos conceptos con la teoría de la probabilidad, aunque la lógica difusa y esta última teoría persiguen fines distintos.

Existen numerosas funciones de pertenencia de sistemas difusos en la literatura. Entre éstas, las más conocidas son las funciones triangulares y la función

gaussiana, que será empleada en el modelo construido en este trabajo. Una función de pertenencia gaussiana tiene la forma de una función gaussiana fijada por su centro (c) y su radio (σ), valiendo la unidad en el punto central y tendiendo a cero conforme nos alejamos de él, sin llegar nunca a dicho valor:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{(III.14.)}$$

Por ejemplo, dado una variable temperatura con universo de trabajo de $[0^\circ, 50^\circ]$, un conjunto difuso “temperatura buena” podría venir dado por una función gaussiana con centro en 24° y anchura 5° , con fórmula:

$$\mu_{\text{temperatura buena}} = e^{-\frac{(x-24^\circ)^2}{2(5^\circ)^2}} \quad \text{(III.15.)}$$

y cuya gráfica vendría dada por:

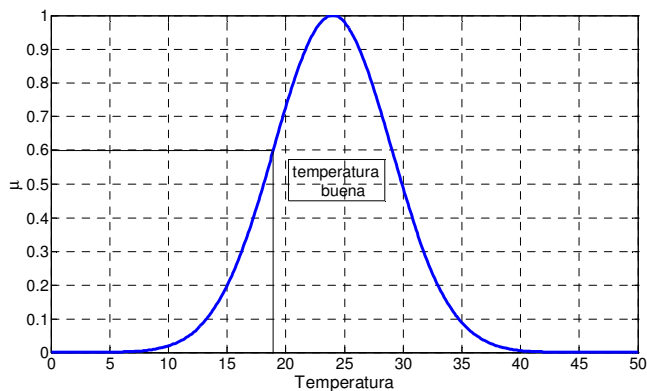


Figura III.10. Función de pertenencia.

En la construcción de esta función de pertenencia entendemos que “temperatura buena” es aquella que está en torno a 24° . Así para este conjunto difuso, el valor 19° tendría un valor de pertenencia de 0.6. El valor 24° se corresponde con el *centro* de la función de pertenencia, y tendría un valor de

pertenencia de 1. Valores muy lejanos como 0^º tendrían un valor de pertenencia práctico de 0.

III.2.3.4.2. Razonamiento aproximado: Reglas difusas e Inferencia difusa

Los elementos primitivos de representación del conocimiento humano en el razonamiento aproximado, lo constituyen las *proposiciones difusas*. Una *proposición difusa* es una expresión del tipo: “la temperatura es buena”, donde *temperatura* es una variable y *elevada* es uno de los valores difusos atribuibles a dicha variable. Estas proposiciones primitivas pueden combinarse mediante conectivas lingüísticas de muy diversas formas, todas ellas derivadas de las cuatro siguientes *operaciones fundamentales*:

- *Conjunción* (u operación *O*, denotado por $p \wedge q$): donde se forma una nueva proposición basada en la veracidad de ambas proposiciones.
- *Disyunción* (u operación *Y*, denotado por $p \vee q$): donde se forma una nueva proposición basada en la veracidad de una de las dos proposiciones.
- *Implicación* (denotado por $p \rightarrow q$): que usualmente toma la forma de reglas difusas de tipo SI-ENTONCES (if-then).
- *Negación* (denotado por $\neg p$): junto con las proposiciones generadas utilizando conjunción, disyunción o implicación, una nueva proposición puede ser obtenida mediante el uso del prefijo “Es falso que ...”, a una proposición existente.

III.2.3.4.2.1. Regla difusa

Una *regla difusa* es, por tanto, una sentencia condicional expresada simbólicamente como:

$$\text{SI } \textit{proposicion}_A \text{ ENTONCES } \textit{proposicion}_B$$

donde tanto *proposicion_A* como *proposicion_B* pueden ser proposiciones difusas simples (un solo término: “la temperatura es buena”) o compuestas (varios términos: “la temperatura es buena” y “la humedad es alta”) . La parte “SI” se denomina

antecedente de la regla mientras que la parte “**ENTONCES**” es el *consecuente*. En el modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK) utilizado en este trabajo, los consecuentes son una función numérica de las entradas del sistema, que en este trabajo se considerará un valor constante, por ejemplo:

SI la temperatura es buena ENTONCES el grado de bienestar es de 9

donde *buena* es un valor difuso correspondiente a la variable temperatura y 9 es un valor fijo asignado a la variable “grado de bienestar”. Una regla difusa tipo TSK relaciona por tanto el conjunto difuso asociado a la proposición antecedente con el valor numérico asociado a la proposición consecuente.

III.2.3.4.2.2. Inferencia difusa en una regla

Para la obtención de una conclusión, a partir de unos antecedentes dados, se utiliza lo que se denomina *proceso de inferencia difuso*. Este proceso consiste fundamentalmente en realizar cálculos entre los conjuntos difusos asociados a las proposiciones que componen las reglas para obtener una conclusión numérica (para *sistemas TSK*). Existen dos mecanismos fundamentales de inferencia: el *Modus Ponens Generalizado (GPM)* y el *Modus Tollens Generalizado (GTM)*, aunque el utilizado normalmente es el *Modus Ponens Generalizado* y consiste en:

premisa 1: X es P'
 premisa 2: Si X es P ENTONCES Z es B

 conclusión: Z es B'

donde P es un valor lingüístico asociado con un conjunto difuso, y P' , B y B' son valores numéricos. En lógica clásica una regla es disparada si y solo si la premisa es exactamente igual al antecedente de la regla. En la lógica difusa, por el contrario, una regla es activada siempre y cuando exista una similitud entre la premisa y el antecedente de la regla ($\mu_P(P') > 0$), permitiendo por tanto distintos grados de activación de la regla.

El valor B' obtenido como conclusión tras el proceso de inferencia para una regla, dado un valor de la variable x , se puede calcular de la siguiente forma, utilizando el operador producto \bullet para la función de implicación:

$$B' = \mu_P(P') \overset{\text{implicación}}{\tilde{\bullet}} B = \alpha_1 \bullet B \quad \text{(III.16.)}$$

donde se ha simbolizado con α_1 el grado de semejanza entre el valor P del antecedente de la regla y el valor P' medido (valor de la función de pertenencia $\mu_P(x)$ para $x = P'$). Así, como ejemplo para la regla anterior:

SI la temperatura es buena ENTONCES el grado de bienestar es de 9

dada una entrada de temperatura de 19°, y para el conjunto difuso que se muestra en la ecuación (III.15.) en el antecedente de la regla, el valor del “grado de bienestar” sería:

$$B' = \mu_{\text{TemperaturaAlta}}(24^\circ) \overset{\text{implicación}}{\tilde{\bullet}} 9 = 0.6 \bullet 9 = 5.4 \quad \text{(III.17.)}$$

En el caso de utilizar reglas con premisas compuestas en el antecedente, formadas por la conjunción de dos conjuntos difusos, el esquema de razonamiento aproximado utilizado es:

premise 1: X es P' Y Y es Q'
 premise 2: Si X es P Y Y es Q
 ENTONCES Z es B

 conclusión: Z es B'

Generalizando la formulación de la teoría de lógica difusa, el valor B' obtenido como conclusión tras el proceso de inferencia para una regla, dados valores de las variables x e y , se puede calcular de la siguiente forma, utilizando el operador producto \bullet para la función de implicación y para la conjunción de las premisas:

$$B' = \left(\mu_P(P') \overset{\text{conjunción}}{\bullet} \mu_Q(Q') \right) \overset{\text{implicación}}{\bullet} B = \alpha_1 \bullet \alpha_2 \bullet B = \alpha_{\text{regla}} \bullet B \quad \text{(III.18.)}$$

donde se ha simbolizado con α_1 el grado de semejanza entre el valor P del antecedente de la regla y el valor P' medido (valor de la función de pertenencia $\mu_P(x)$ para $x = P'$), α_2 el grado de semejanza entre el valor Q del antecedente de la regla y el valor Q' medido (valor de la función de pertenencia $\mu_Q(y)$ para $y = Q'$) y α_{regla} la actividad total de la regla.

III.2.3.4.2.3. Inferencia difusa en un sistema de reglas

Finalmente, si en lugar de tener una regla tenemos muchas, debemos recurrir a una última operación en el proceso de inferencia, llamado *operador de agregación*, de tal forma que podamos, a partir de una entrada difusa dada, obtener la salida inferida a través de un conjunto de reglas difusas. Este operador es generalmente una media ponderada para los sistemas *TSK*. Así, si tenemos un conjunto de reglas, que de forma genérica representamos como:

$$\text{Si } x_1 \text{ es } \mu_1^k(x_1) \text{ Y } \dots \text{ Y } x_n \text{ es } \mu_n^k(x_n) \text{ ENTONCES } Z \text{ es } B_k \quad \text{(III.19.)}$$

siendo $\mu_i^k(x_i)$ la función de pertenencia de la regla k para la variable de entrada x_i , n el número de variables de entrada, y B_k el valor constante del consecuente de la regla k . El valor B' de la variable de salida Z para un sistema de reglas de la forma anterior, se puede calcular utilizando agregación por media ponderada como:

$$B' = \frac{\underbrace{\sum_{k=1}^{n\text{reglas}} \alpha_k}_{\text{agregación}} \overset{\text{implicación}}{\bullet} B_k}{\underbrace{\sum_{k=1}^{n\text{reglas}} \alpha_k}_{\text{agregación}}} \quad \text{(III.20.)}$$

siendo:

- α_k : grado con el que el vector de entrada activa la regla k
- B_k : valor devuelto por el consecuente de la regla k .

donde los α_k se calculan en función de los valores numéricos exactos de las entradas $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$, $\vec{x}' = \{x_1', \dots, x_n'\}$, de forma similar a la ecuación (III.18.):

$$\alpha_k \equiv \prod_{\substack{i=1 \\ \text{conjunción}}}^n \alpha_{i,k} = \prod_{\substack{i=1 \\ \text{conjunción}}}^n \mu_i^k(x_i') \quad (\text{III.21.})$$

En resumen, a partir de las ecuaciones anteriores ((III.20.) y (III.21)), la salida numérica de nuestro sistema para un vector de entrada no difuso genérico, utilizando la T-norma producto y agregación por media ponderada, vendrá dada por:

$$\tilde{F}(\vec{x}) = \frac{\sum_{k=1}^{n\text{reglas}} B_k \cdot \prod_{i=1}^n \mu_i^k(x_i)}{\sum_{k=1}^{n\text{reglas}} \prod_{i=1}^n \mu_i^k(x_i)} \quad (\text{III.22.})$$

III.2.3.4.3. Optimización de un sistema difuso basado en reglas para modelado de datos

La optimización de un conjunto difuso para que modele un sistema del que tenemos un conjunto de muestras de datos de entrada y salida, conlleva los siguientes pasos:

- cálculo de los consecuentes óptimos de las reglas (valores B_k en las reglas)
- ajuste de los parámetros de las funciones de pertenencia en los antecedentes (ajustes de los centros y radios de las funciones de pertenencia, siendo éstas gaussianas)

Existen un gran número de metodologías de aprendizaje de sistemas difusos. De entre éstas podemos distinguir principalmente entre 2 tipos: *técnicas automáticas* (Pomares, 2002) y *técnicas basadas en algoritmos genéticos o sistemas difusos genéticos* (Cordon, 2002). Los *algoritmos genéticos* son altamente eficaces en la búsqueda de soluciones, pero sin embargo presentan el problema del coste computacional, que para sistemas difusos complejos puede ser excesivo. En el modelo construido en este trabajo, se utilizó una metodología para la optimización de los consecuentes de las reglas dado un sistema de conjuntos difusos y particionamiento del espacio de entrada dado (parámetros en las funciones de pertenencia en los antecedentes ya fijados) (Rojas, 2000; Pomares, 2002).

III.2.3.4.3.1. Optimización de un sistema difuso a partir de un conjunto de reglas con antecedentes fijados

La optimización de un modelo lineal o no lineal, busca minimizar normalmente la función del error cuadrático medio, dada por:

$$J = \frac{\sum_{m \in D} (\tilde{F}(\bar{x}^m) - y^m)^2}{\#D} \quad (\text{III.23.})$$

donde D es el conjunto de datos de entrada y salida indexado por el índice m $\{\bar{x}^m, y^m\}$, y $\#D$ es su tamaño. Dado que la función de salida de un sistema difuso tipo *TSK* es lineal con respecto a todos los parámetros de los consecuentes (ver ecuación (III.22.)) la minimización de la función de error lleva a la creación de un sistema de ecuaciones que se puede resolver mediante cualquier método matemático destinado a tal efecto. Entre estos métodos, la *Descomposición de Valores Singulares (SVD)* (Golub, 1961) se utiliza en esta Memoria puesto que además de calcular los valores óptimos, permite realizar un ranking de los coeficientes más relevantes, pudiéndose eliminar valores con poco peso que en algunos casos llevan a redundancia y a soluciones inmanejables (se podría eliminar reglas innecesarias).

Entrando en más detalle, la minimización de la función J dada en la ecuación anterior respecto de los consecuentes B_k , se realiza igualando las derivadas de dicha función respecto de dichos parámetros a 0. Así, para cada B_k :

$$\frac{\partial J}{\partial B^k} = \frac{2}{\#D} \sum_{m \in D} \left(y^m - \frac{\sum_{j=1}^{nreglas} \mu^j(\bar{x}^m) \bullet B^j}{\sum_{j=1}^{nreglas} \mu^j(\bar{x}^m)} \right) \frac{\mu^k(\bar{x}^m)}{\sum_{j=1}^{nreglas} \mu^j(\bar{x}^m)} \quad (\text{III.24.})$$

que igualando a 0, lleva a un sistema de ecuaciones de la forma, una para cada coeficiente B_k , que se resolvería mediante SVD:

$$\sum_{j=1}^{nreglas} \sum_{m \in D} \frac{\mu^k(\bar{x}^m) \mu^j(\bar{x}^m) \bullet B^j}{\sum_{j=1}^{nreglas} \mu^j(\bar{x}^m)} = \sum_{m \in D} \frac{y^m \mu^k(\bar{x}^m)}{\sum_{j=1}^{nreglas} \mu^j(\bar{x}^m)} \quad (\text{III.25.})$$

Como ya se ha comentado, la solución de este sistema de ecuaciones daría como resultado los consecuentes óptimos para el sistema de reglas, que proporcionaría un ajuste mejor (menor valor de error cuadrático medio J), dado el conjunto de datos de entrada/salida D .

Resultados

A continuación se expondrán los resultados más significativos de nuestro trabajo de acuerdo con los objetivos planteados.

En primer lugar, se exponen los *resultados colorimétricos* obtenidos para los grupos experimentales considerados, tomando, en ambos casos, al diente como unidad de estudio, así como los resultados colorimétricos en el espacio CIELAB correspondientes a la guía de color Vitapan Classical®.

Seguidamente, se mostrará el *análisis estadístico* empleado para evaluar la influencia de variables exógenas como, por ejemplo, la edad o el sexo, en el proceso del blanqueamiento dental.

A continuación, se expondrán los *modelos lineales univariantes y multivariantes* para la predicción del cambio cromático en el espacio CIELAB, obtenidos tanto para el grupo de pacientes normales como para el grupo de pacientes tetraciclínicos.

Finalmente, se mostrará el *sistema de inferencia difusa* diseñado partiendo de los datos colorimétricos pre y post-blanqueamiento en el espacio CIELAB, de los dientes analizados y de la guía Vitapan Classical®, y en el cual las reglas de los antecedentes se corresponden con los valores de cada tablilla de la guía de color. El objetivo del sistema difuso diseñado será modelar el color post-blanqueamiento

dado un color pre-blanqueamiento. Queremos destacar que una propiedad importante del sistema diseñado es que los consecuentes de las reglas definen directamente, sin necesidad de ningún proceso de inferencia previo, el valor CIELAB esperado para cada tono VITA pre-blanqueamiento. Esta propiedad se obtiene por una modificación del diseño del sistema, que está inspirada en trabajos anteriores para otras tipologías de modelos difusos y que obtienen resultados similares. Por último, y adicionalmente, el trabajo propuesto usa los valores de los consecuentes de las reglas para estimar qué tono de la guía Vitapan Classical® es el esperado, después del proceso de blanqueamiento, para cada tono VITA pre-blanqueamiento.

IV.1. Resultados colorimétricos

IV.1.1. Pacientes Normales

Como ya se ha comentado anteriormente, se realizaron medidas con el espectrorradiómetro en cada uno de los dientes (1.3 a 2.3) de los 37 voluntarios participantes en tres momentos temporales del estudio. El color se midió antes de iniciar el blanqueamiento (*pre-blanqueamiento*), a los 7 días y a los 15 días (24 horas después de terminar el tratamiento, *post-blanqueamiento*). En cada momento, la medición por diente se realizó por triplicado. Contamos pues, con 222 muestras para este grupo de pacientes y un total de 1998 medidas realizadas.

Dada la extensión de los resultados, y para facilitar la consulta de los mismos, éstos se incluyen en un CD anexo a la Memoria. A modo de ejemplo, vamos a mostrar los resultados correspondientes a dos pacientes de este grupo. Para una mejor comprensión de las tablas **IV.1.** y **IV.2.**, en las que mostramos los valores medios de las medidas realizadas sobre los dientes *in vivo*, queremos señalar que se ha identificado cada diente mediante un código constituido por las iniciales del nombre y primer apellido del paciente al que pertenece seguido por el código del diente. Por ejemplo, EV11 corresponde al valor medio de las medidas realizadas al incisivo central superior derecho del sujeto EV en un momento determinado del estudio.

Diente		a*	b*	L*	C*	h°	EW*	WIO
Pre-blanq.	EV11	5,54	12,40	64,11	11,95	67,41	38,37	331,94
	EV12	6,58	13,20	60,12	11,90	64,11	42,52	275,18
	EV13	7,28	15,00	52,71	16,93	62,12	50,14	154,57
	EV21	5,86	13,60	63,57	13,77	67,72	39,32	314,65
	EV22	5,92	13,90	54,82	13,55	66,02	47,64	194,72
	EV23	5,69	14,20	50,85	18,05	66,98	51,47	120,04
7 días	EV11	5,35	11,80	70,06	10,52	66,69	32,62	423,56
	EV12	6,42	12,90	64,68	9,72	64,13	38,15	329,53
	EV13	6,66	14,30	65,49	15,46	64,49	37,95	338,59
	EV21	5,56	12,70	70,60	12,81	67,04	32,51	426,97
	EV22	4,35	12,40	61,80	12,33	69,36	40,40	293,95
	EV23	4,83	13,40	58,69	15,00	71,23	43,69	233,81
Post-blanq.	EV11	4,59	9,83	74,93	10,06	64,89	27,32	517,36
	EV12	5,20	11,20	71,10	8,51	63,03	31,42	440,27
	EV13	5,91	12,40	74,33	15,17	63,26	29,12	493,53
	EV21	5,22	9,92	76,57	11,13	65,50	25,98	544,72
	EV22	3,98	11,50	64,62	10,11	63,17	37,42	336,37
	EV23	3,65	11,20	68,28	14,71	67,26	33,83	386,55

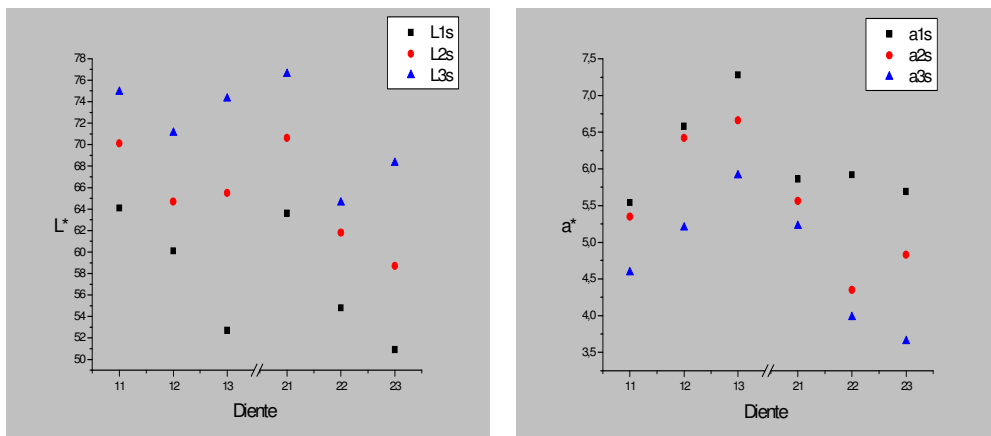
Tabla IV.1. Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB e índices de blanqueamiento EW^* y WIO para el sujeto EV.

Diente		a*	b*	L*	C*	h°	EW*	WIO
Pre-blanq.	RC11	5,57	11,90	56,24	13,13	64,89	45,69	215,38
	RC12	7,50	12,80	57,74	14,81	59,58	44,79	230,79
	RC13	9,82	13,80	40,61	16,91	54,50	61,76	36,42
	RC21	5,59	10,80	57,51	12,04	64,04	44,19	238,58
	RC22	6,08	11,10	53,38	12,67	61,32	48,30	185,74
	RC23	8,94	15,40	40,17	17,78	59,82	62,43	19,60
7 días	RC11	4,46	11,00	59,87	12,25	63,53	41,85	269,89
	RC12	5,97	7,75	61,04	9,79	52,39	40,17	305,50
	RC13	8,24	11,77	53,05	12,78	49,86	49,10	191,10
	RC21	5,11	10,00	60,14	11,80	63,34	41,41	276,27
	RC22	4,92	10,20	56,40	11,84	59,56	45,04	228,64
	RC23	7,35	13,40	42,09	15,76	58,00	59,90	51,77
Post-blanq.	RC11	3,58	7,39	64,86	8,21	64,19	36,09	363,87
	RC12	5,51	6,47	64,91	11,15	58,20	36,10	353,72
	RC13	6,50	10,60	61,37	7,52	58,47	40,58	293,85
	RC21	4,26	9,49	69,66	10,40	65,84	32,07	430,94
	RC22	3,44	6,17	58,56	7,06	60,87	42,04	249,39
	RC23	4,67	9,18	44,79	10,30	63,01	56,16	105,29

Tabla IV.2. Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB e índices de blanqueamiento EW^* y WIO para el sujeto RC.

Como podemos observar en las tablas **IV.1.** y **IV.2.**, para cada diente se obtuvieron los valores medios de las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* , además del croma C^* y el ángulo de tono h^{θ} . También se obtuvieron los valores medios de los índices de blanqueamiento EW^* y WIO . La desviación estándar de las tres medidas realizadas a cada diente es menor que el error instrumental del aparato.

Si representamos la luminosidad, L^* , que se muestra en estas tablas para estos pacientes (figuras **IV.1.** y **IV.2.**), podemos observar que dicho parámetro aumenta tras el tratamiento blanqueador. Mientras que las coordenadas a^* (figuras **IV.2.** y **IV.5.**) y b^* (figuras **IV.3.** y **IV.6.**) tienden a disminuir tras el blanqueamiento, acercándose al $(0,0)$, como veremos más adelante para el conjunto total de muestras (figuras **IV.7.** y **IV.8.**).



Figuras **IV.1.** y **IV.2.** Representación de las coordenadas L^* y a^* , respectivamente, para el paciente EV (**L1s** y **a1s**: pre-blanqueamiento; **L2s** y **a2s**: 7 días; **L3s** y **a3s**: post-blanqueamiento).

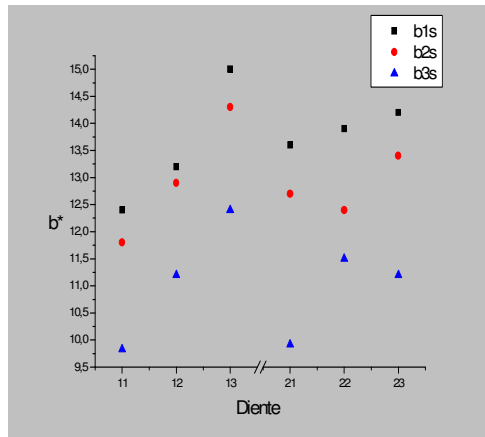
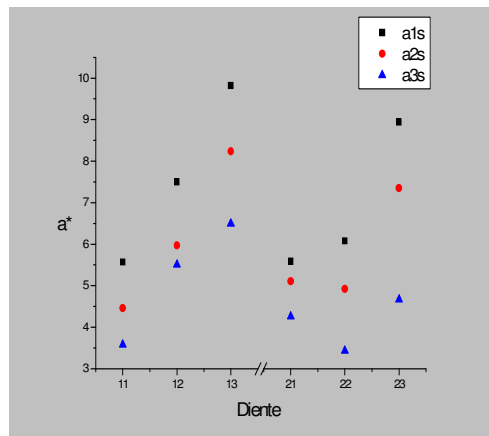
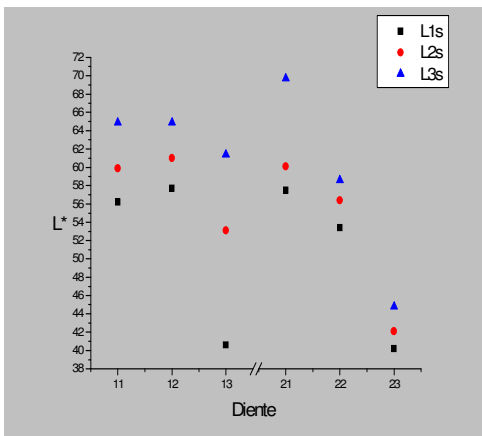


Figura IV.3. Representación de la coordenada b^* para el paciente EV (**b1s**: pre-blanqueamiento; **b2s**: 7 días; **b3s**: post-blanqueamiento).



Figuras IV.4. y IV.5. Representación de las coordenadas L^* y a^* , respectivamente, para el paciente RC (**L1s** y **a1s**: pre-blanqueamiento; **L2s** y **a2s**: 7 días; **L3s** y **a3s**: post-blanqueamiento).

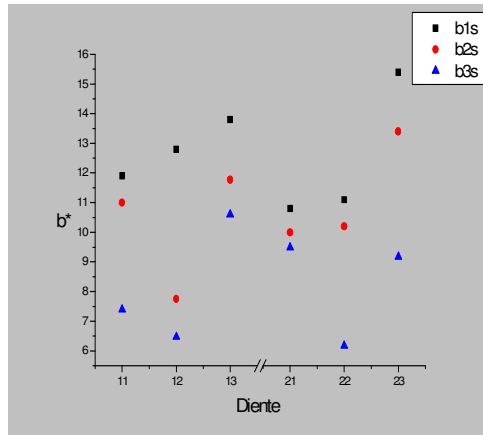
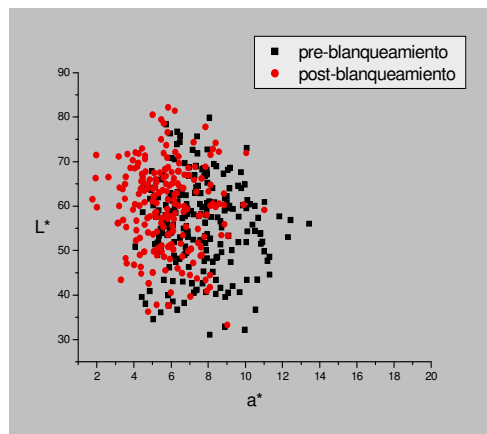
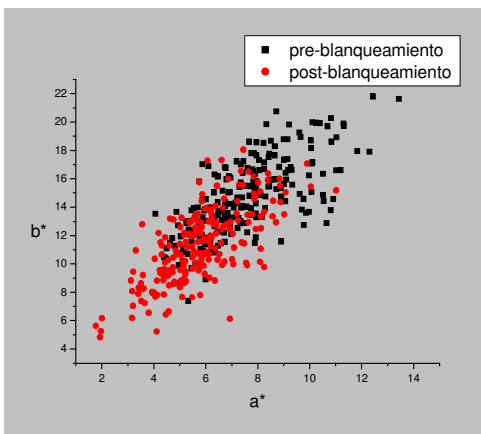


Figura IV.6. Representación de la coordenada b^* para el paciente RC (**b1s**: pre-blanqueamiento; **b2s**: 7 días; **b3s**: post-blanqueamiento).

Las figuras IV.7. y IV.8. muestran la distribución de los valores medios de las coordenadas cromáticas a^* , b^* y L^* para el grupo de pacientes normales en las que podemos observar la tendencia de las mismas hacia el blanco modelo (100,0,0).



Figuras IV.7. y IV.8. Representación de los valores medios de las coordenadas a^* y b^* , y a^* y L^* , respectivamente, para todos los dientes del grupo de pacientes normales (■: pre-blanqueamiento; ●: post-blanqueamiento).

Igualmente, la figura IV.9. muestra la distribución de los valores medios para el croma C^* y el ángulo de tono h° .

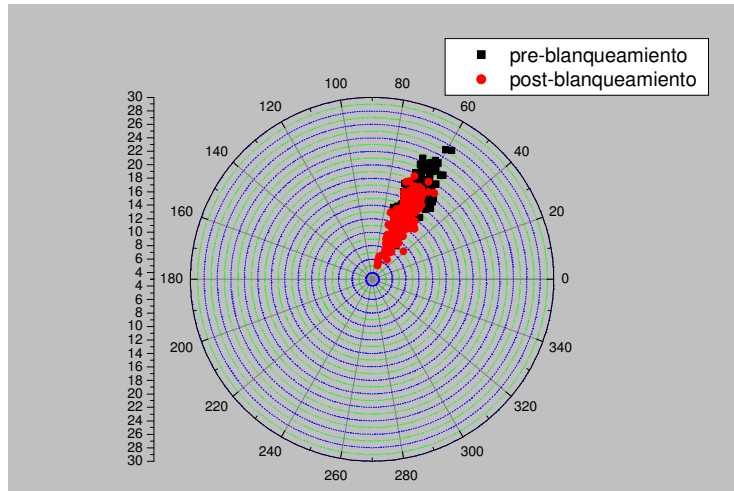


Figura IV.9. Representación, en coordenadas polares, de los valores medios de C^* y h° obtenidos para todos los dientes en el grupo de pacientes normales (■: pre-blanqueamiento; ●: post-blanqueamiento).

A continuación se muestran los rangos de distribución, la media y la desviación estándar de los valores medios de L^* , a^* , b^* , C^* , h° , EW^* y WIO , para el conjunto total de los dientes (tabla IV.3.) y para cada diente (tabla IV.4.) de los pacientes normales antes, a la semana y tras el proceso de blanqueamiento.

PACIENTES NORMALES	Pre-blanq.		7 días		Post-blanq.	
	Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)
L^*	31,05-79,85	56,17 (9,78)	29,77-77,67	59,49 (9,76)	33,21-82,16	59,31 (9,84)
a^*	4,07-18,5	7,58 (1,95)	3,15-23,79	6,53 (2,02)	1,77-11,21	5,75 (1,63)
b^*	7,38-21,78	14,59 (2,71)	2,79-21,38	12,03 (2,72)	4,82-24,93	11,22 (2,83)
C^*	9,09-25,46	16,50 (3,05)	4,82-25,28	13,78 (3,02)	5,19-27,33	12,65 (3,10)
h°	26,24-73,27	62,64 (4,63)	19,74-74,78	61,40 (6,12)	41,47-74,44	62,79 (4,61)
EW^*	27,33-70,81	47,05 (9,18)	24,69-71,84	42,93 (9,66)	22,60-70,77	42,81 (9,43)
WIO	-68,54-597,64	198,44 (142,27)	-55,74-583,48	274,63 (137,21)	-23,04-666,68	278,24 (134,68)

Tabla IV.3. Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L^* , a^* , b^* , C^* , h° , EW^* y WIO^* medidos para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.

Diente	Coord.	Pre-blanq.		7 días		Post-blanq.	
		Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)
Diente 1.1	L*	43,1-76,31	61,13(7,72)	47,39-75,43	63,34(7,94)	42,59-80,51	62,48(7,81)
	a*	4,49-10,06	6,71(1,28)	3,71-8,09	5,69(1,07)	1,94-8,26	5,17(1,29)
	b*	7,38-18,79	13,65(2,42)	5,68-15,11	11,13(2,01)	4,82-14,59	10,20(2,35)
	C*	9,09-20,83	15,23(2,59)	7,49-16,16	12,54(2,04)	5,19-16,06	11,47(2,55)
	h ^o	54,04-68,26	63,73(3,36)	49,23-71,28	62,62(4,75)	51,84-70,68	63,04(4,25)
	EW*	28,03-58,39	41,94(7,08)	26,61-53,59	38,85(7,66)	23,13-58,26	39,38(7,44)
	WIO	72,24-535,6	283,18(112,59)	123,1-544,39	333,88(115,43)	88,38-634,94	322,42(114,99)
Diente 1.2	L*	39,94-73,02	59,79(7,28)	50,79-69,89	62,92(5,85)	45,03-79,42	61,64(8,26)
	a*	5,03-10,81	7,39(1,57)	4,16-12,11	6,66(1,56)	3,21-8,25	5,94(1,25)
	b*	8,9-19,7	13,57(2,43)	5,79-15,28	11,18(1,95)	6,13-16,13	10,52(2,54)
	C*	10,74-22,41	15,49(2,68)	7,71-17,04	13,08(2,11)	7,74-17,94	12,12(2,64)
	h ^o	51,89-67,81	61,42(4,03)	44,69-66,87	59,13(5,78)	41,47-66,44	60,2(5,11)
	EW*	32,5-61,28	43,28(6,61)	32,01-51,44	39,41(5,65)	22,62-55,83	40,43(7,67)
	WIO	50,51-466,6	263,43(97,41)	140,34-438,88	319,39(86,78)	113,48-629,41	309,8(118,97)
Diente 1.3	L*	38,22-67,21	51,88(6,55)	34,67-69,48	54,68(8,16)	33,21-74,32	54,97(9,36)
	a*	6,25-12,3	9,43(1,45)	3,31-12,92	7,79(1,83)	1,97-11,02	6,82(1,69)
	b*	12,2-20,74	16,79(2,46)	7,84-21,38	13,57(2,97)	5,25-18,04	12,47(2,97)
	C*	13,92-22,97	19,3(2,54)	8,51-23,14	15,7(3,23)	5,61-19,73	14,25(3,26)
	h ^o	50,38-67,22	60,57(3,81)	49,91-70,26	60,02(4,78)	51,4-69,45	61,28(4,24)
	EW*	36,26-63,33	52,08(6,04)	32,36-67,74	48,1(7,96)	29,09-68,73	47,44(8,83)
	WIO	-68,54-229,39	43,87(72,78)	-22,1-427,4	96,38(103,0)	-23,04-493,53	209,74(120,67)
Diente 2.1	L*	50,98-79,85	63,45(7,26)	50,69-77,67	66,03(7,61)	42,6-81,39	66,27(7,12)
	a*	4,87-18,5	6,99(2,32)	3,21-8,91	5,19(1,27)	2,63-8,12	5,19(1,29)
	b*	9,12-19,26	13,97(2,39)	2,79-17,07	11,67(2,64)	6,32-15,77	11,0(2,35)
	C*	11,06-21,52	15,76(2,6)	4,82-18,15	13,07(2,71)	6,84-16,88	12,19(2,57)
	h ^o	26,24-70,36	63,65(6,86)	35,28-71,58	63,08(6,09)	53,72-71,19	64,74(3,62)
	EW*	27,33-50,26	40,04(6,31)	24,69-50,9	36,54(7,38)	24,0-58,26	36,08(6,43)
	WIO	166,19-597,64	315,96(114,78)	151,48-583,48	368,96(124,83)	88,38-643,66	375,55(106,4)
Diente 2.2	L*	39,52-72,69	56,05(7,57)	40,36-75,59	60,12(8,76)	45,03-82,16	59,97(8,49)
	a*	4,07-10,52	6,78(1,51)	3,15-8,82	5,67(1,32)	1,77-8,86	5,17(1,49)
	b*	8,63-18,67	13,62(2,36)	4,26-16,05	10,97(2,57)	5,63-15,51	10,4(2,42)
	C*	9,9-20,52	15,24(2,61)	6,01-17,72	12,4(2,63)	5,91-17,86	11,65(2,69)
	h ^o	54,69-73,27	63,57(3,89)	45,17-74,78	62,19(5,75)	53,08-74,44	63,63(4,44)
	EW*	33,96-61,54	46,74(6,57)	27,95-61,57	41,92(8,38)	22,6-55,83	41,88(7,91)
	WIO	47,7-442,16	212,67(93,38)	31,19-514,5	285,52(121,97)	113,48-666,68	286,8(121,86)
Diente 2.3	L*	31,05-63,94	44,62(8,45)	29,77-70,77	49,77(10,33)	34,72-71,91	50,41(9,36)
	a*	4,62-13,44	8,26(1,93)	4,29-23,8	7,62(3,13)	2-11,21	6,26(1,95)
	b*	11,5-21,78	16,01(2,38)	8,12-21,03	13,73(2,66)	6,17-24,93	12,74(3,2)
	C*	12,39-25,46	18,06(2,77)	9,69-25,28	15,92(3,13)	6,49-27,33	14,24(3,58)
	h ^o	53,86-70,97	62,87(4,22)	19,74-72,95	61,34(8,25)	56,77-73,17	64,04(4,48)
	EW*	41,67-70,81	58,46(7,31)	34,6-71,84	52,92(9,55)	33,59-70,77	51,79(8,94)
	WIO	-44,06-289,36	67,32(82,51)	-55,74-398,12	141,56(119,02)	-1,91-443,84	163,3(109,7)

Tabla IV.4. Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L*, a*, b*, C*, h^o, EW* y WIO* medidos para cada diente en el grupo de pacientes normales.

Las figuras IV.10. y IV.11. muestran la distribución en el espacio CIELAB de las mediciones de color inicial y final, para todas las piezas dentales en el grupo de pacientes normales.

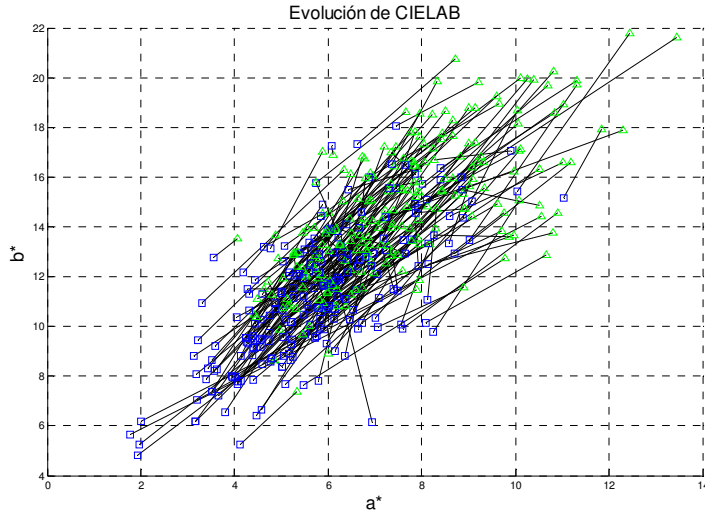


Figura IV.10. Vista parcial del plano a^* y b^* de CIELAB de las mediciones de color.
Δ: medición inicial del color del diente, **□**: medición final del color del diente,
-: trayectoria seguida por la variación del color.

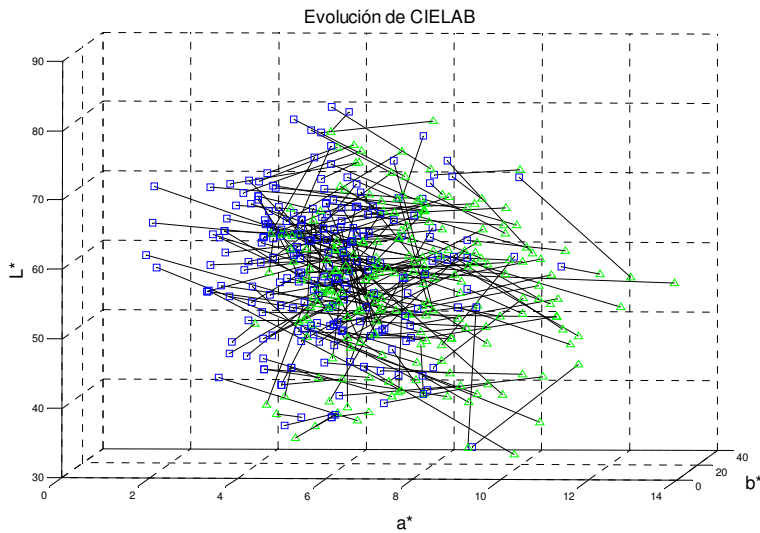


Figura IV.11. Vista parcial del plano a^* y L^* de CIELAB de las mediciones de color.
Δ: medición inicial del color del diente, **□**: medición final del color del diente,
-: trayectoria seguida por la variación del color.

La distribución de las variaciones de L^* , a^* , b^* y EW^* (ΔL^* , Δa^* , Δb^* y ΔEW^*), entre las mediciones realizadas antes y después del blanqueamiento se muestran a continuación (figuras de la IV.12. a la IV.15.).

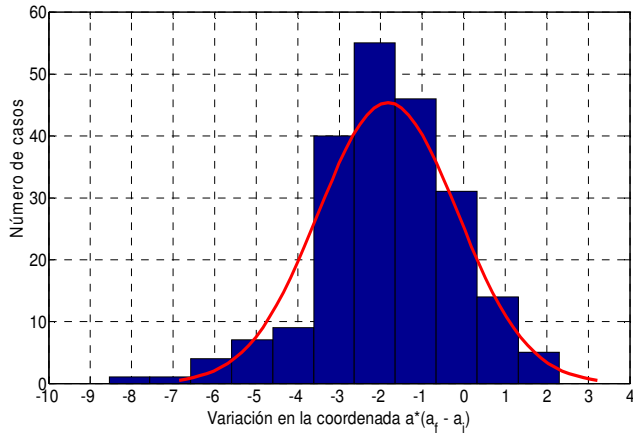


Figura IV.12. Histograma de las variaciones en la coordenada a^* (Δa^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.

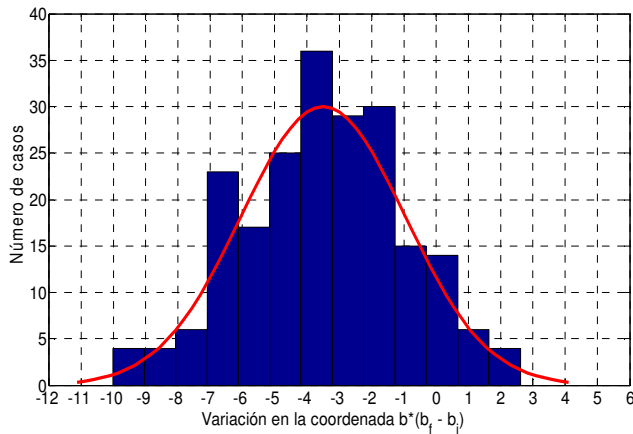


Figura IV.13. Histograma de las variaciones en la coordenada b^* (Δb^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.

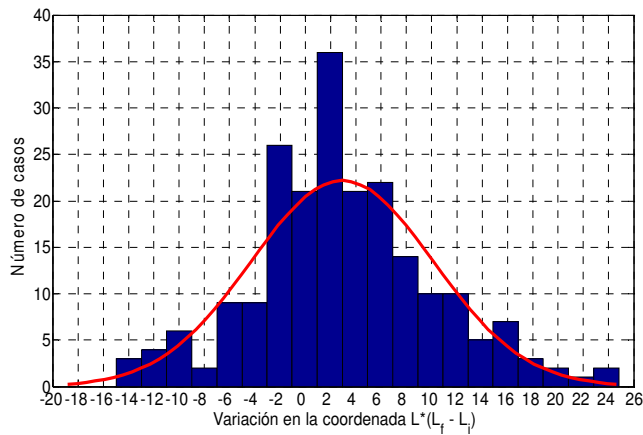


Figura IV.14. Histograma de las variaciones en la coordenada L^* (ΔL^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.

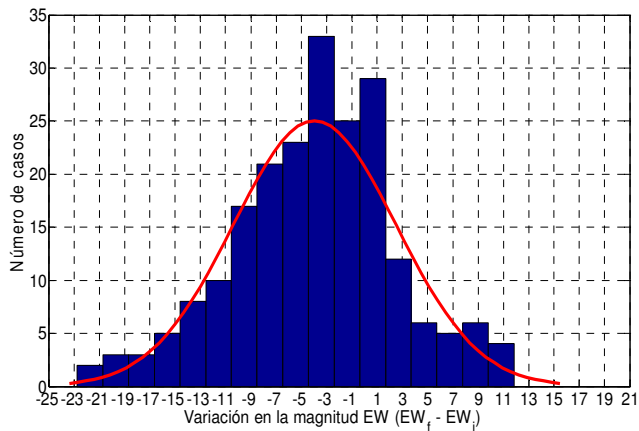


Figura IV.15. Histograma de las variaciones en EW^* (ΔEW^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes normales.

Para cada uno de los parámetros anteriores, se observa que los datos siguen una distribución muy similar a la normal, hecho este corroborado por el test de Lilliefors (Lilliefors, 1967), que confirma que no se puede rechazar la hipótesis de que dichos histogramas siguen una distribución normal.

Para el grupo de pacientes normales, las distribuciones de los datos en estos histogramas se pueden ajustar a distribuciones normales con medias y desviaciones típicas $(\mu, \sigma) = (2.9, 7.2), (-1.8, 1.7), (-3.5, 2.5)$ y $(-4.1, 6.6)$ en las coordenadas L^* , a^* y b^* así como en EW^* , respectivamente.

Como podemos observar en las figuras **IV.12.**, **IV.13.** y **IV.14.**, las coordenadas L^* , a^* y b^* tienden a acercarse al blanco modelo $(100,0,0)$ tras el tratamiento blanqueador, de ahí que las medias de Δa^* y Δb^* fueran negativas mientras que la media de ΔL^* fue positiva.

En cuanto al índice de blanqueamiento EW^* , sabemos que un menor valor de este parámetro muestra una menor distancia de las coordenadas cromáticas de un diente cualquiera al blanco modelo $(100,0,0)$, lo que significa que el diente en cuestión es más acromático. Como puede verse en la figura **IV.15.**, la variación media negativa de este índice (ΔEW^*) confirma la tendencia hacia estímulos más acromáticos.

IV.1.2. Pacientes Tetraciclínicos

Al igual que en el grupo anterior, se realizaron tres medidas espectrorradiométricas, para cada diente (1.3 a 2.3), antes de iniciar el blanqueamiento (*pre-blanqueamiento*), a los 7 días y a los 15 días (*post-blanqueamiento*). Para este grupo de 16 voluntarios, contamos con 96 muestras y un total de 864 medidas realizadas.

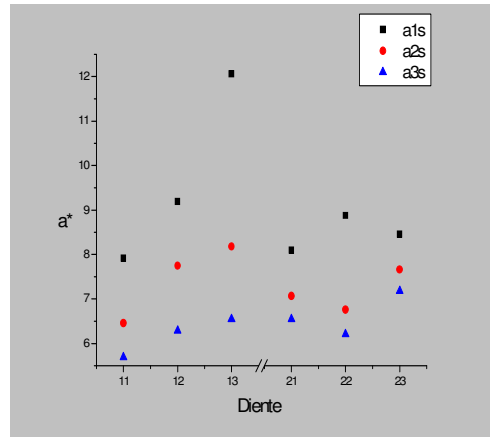
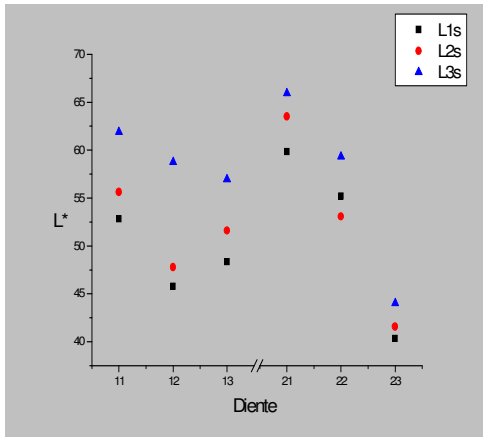
A modo de ejemplo, la tabla **IV.5.** muestra los valores medios de las medidas realizadas sobre los dientes objeto de estudio para el paciente PG. El resto de los resultados para este grupo de pacientes también se incluyen en el CD anexo a la Memoria.

Para cada diente se obtuvieron los valores medios de las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* , además del croma C^* y el ángulo de tono h° . También se obtuvieron los valores medios de los índices de blanqueamiento EW^* y WIO . La desviación estándar de las tres medidas realizadas a cada diente es menor que el error instrumental del aparato (5%).

Diente		a^*	b^*	L^*	C^*	h°	EW^*	WIO
Pre-blanq.	PG11	7,92	13,22	52,85	24,63	80,45	49,60	166,92
	PG12	9,19	14,17	45,80	25,54	75,67	56,77	82,82
	PG13	12,06	17,47	48,38	31,11	71,21	55,81	91,65
	PG21	8,10	15,76	59,86	28,36	83,22	43,88	244,07
	PG22	8,88	15,62	55,21	27,98	79,89	48,26	182,38
	PG23	8,46	16,70	40,35	22,98	75,29	62,52	40,88
7 días	PG11	6,46	9,83	55,63	20,31	88,62	45,90	225,73
	PG12	7,75	11,13	47,80	21,97	83,38	53,93	137,13
	PG13	8,18	11,34	51,62	22,21	81,58	50,36	100,17
	PG21	7,07	12,92	63,52	24,88	86,69	39,34	316,17
	PG22	6,76	11,63	53,08	22,56	85,14	48,81	187,28
	PG23	7,66	12,58	41,59	22,78	77,76	60,24	56,41
Post-blanq.	PG11	5,69	9,83	61,92	18,59	87,54	39,74	306,45
	PG12	6,29	11,13	58,76	18,20	82,23	43,18	254,60
	PG13	6,55	11,34	56,97	19,01	80,28	44,98	230,10
	PG21	6,55	12,92	65,95	23,92	87,03	37,00	351,83
	PG22	6,21	11,63	59,34	20,09	86,08	42,74	259,52
	PG23	7,18	12,58	44,03	21,98	78,97	57,81	75,19

Tabla IV.5. Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB e índices de blanqueamiento EW^* y WIO para el sujeto PG.

De la misma forma que hicimos en el grupo de pacientes normales, en este caso, si representamos la luminosidad, L^* , para este paciente con tinción por tetraciclinas (figura IV.16.), se observa que la tendencia tras el tratamiento blanqueador es análoga a la encontrada para pacientes no tetraciclínicos. Igualmente para las coordenadas a^* (figura IV.17.) y b^* (figura IV.18.) se observan tendencias similares a los pacientes normales.



Figuras IV.16. y IV.17. Representación de las coordenadas L^* y a^* , respectivamente, para el paciente PG (**L1s** y **a1s**: pre-blanqueamiento; **L2s** y **a2s**: 7 días; **L3s** y **a3s**: post-blanqueamiento).

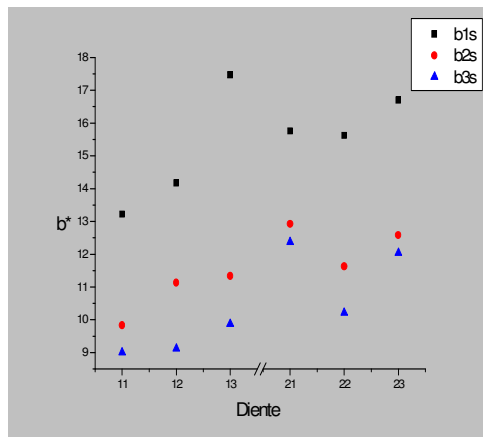
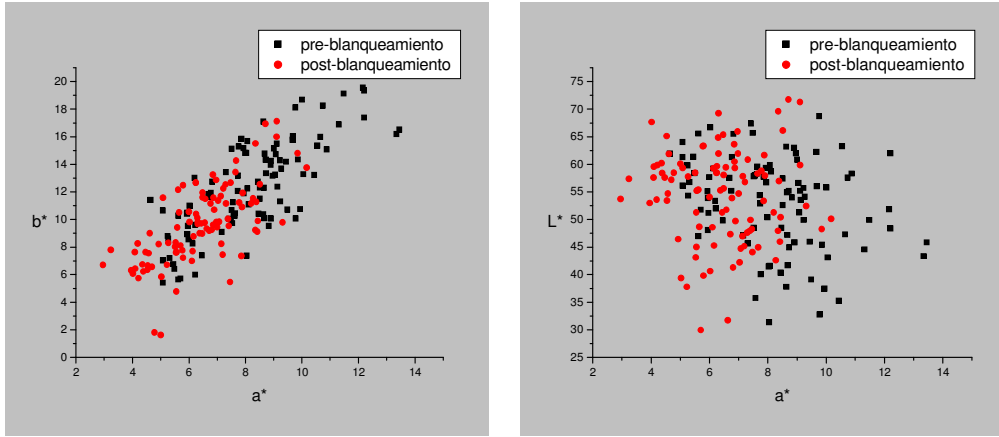


Figura IV.18. Representación de la coordenada b^* para el paciente PG (**b1s**: pre-blanqueamiento; **b2s**: 7 días; **b3s**: post-blanqueamiento).

La distribución de las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* para el grupo de pacientes tetraciclínicos muestran una tendencia hacia el blanco modelo (100,0,0) como podemos observar en las figuras IV.19. y IV.20.



Figuras IV.19. y IV.20. Representación de los valores medios de las coordenadas a^* y b^* , y a^* y L^* , respectivamente, para todos los dientes del grupo de pacientes tetraciclínicos (■: pre-blanqueamiento; ●: post-blanqueamiento).

Al igual que para el grupo de pacientes normales, la figura IV.21. muestra una distribución con tendencias similares para el cromatismo C^* y el ángulo de tono h° .

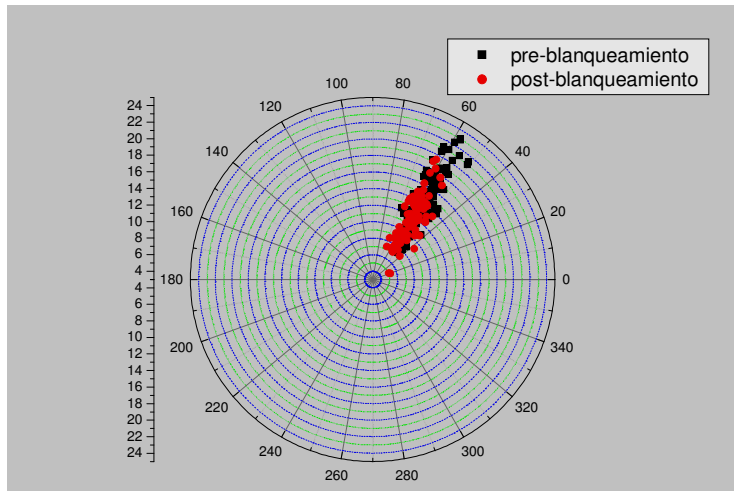


Figura IV.21. Representación, en coordenadas polares, de los parámetros C^* y h° obtenidos para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos (■: pre-blanqueamiento; ●: post-blanqueamiento).

A continuación se muestran los rangos de distribución, la media y la desviación estándar de los valores de L^* , a^* , b^* , C^* , h^o , EW^* y WIO , para el conjunto total de los dientes (tabla IV.6.) y para cada diente (tabla IV.7.) de los pacientes tetraciclínicos antes, a la semana y tras el blanqueamiento.

PAC. TETRACICLÍNICOS	Pre-blanq.		7 días		Post-blanq.	
	Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)
L^*	31,38-68,69	52,99 (8,29)	27,96-71,91	53,16 (9,81)	29,94-71,74	54,34 (8,37)
a^*	4,64-13,45	8,17 (1,93)	-2,38-16,45	6,84 (2,08)	2,96-10,17	6,42 (1,49)
b^*	5,41-19,55	12,29 (3,35)	3,83-18,3	10,3 (2,99)	1,62-17,12	9,66 (2,85)
C^*	7,42-23,02	14,82 (3,66)	6,41-21,05	12,48 (3,22)	5,11-19,39	11,66 (2,95)
h^o	42,49-67,86	55,87 (5,16)	29,45-100,36	55,96 (7,88)	17,96-67,44	55,58 (7,57)
EW^*	34,91-69,48	49,45 (8,08)	31,72-72,78	48,64 (9,23)	32,86-70,76	47,28 (7,99)
WIO	-3,61-391,25	184,28 (98,5)	-18,44-455,43	202,86 (109,7)	-1,93-432,7	216,76 (99,03)

Tabla IV.6. Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L^* , a^* , b^* , C^* , h^o , EW^* y WIO^* medidos para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.

Diente	Coord.	Pre-blanq.		7 días		Post-blanq.	
		Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)	Rango	Media (sd)
Diente 1.1	L*	37,77-61,98	55,74(5,92)	41,57-68,21	57,74(7,34)	47,93-69,24	57,7(5,63)
	a*	5,08-12,21	7,61(2,03)	-2,38-10,41	5,59(2,62)	2,96-9,11	5,98(1,63)
	b*	6,40-19,35	11,89(3,63)	5,72-18,3	9,75(3,14)	6,34-17,12	9,49(2,85)
	C*	8,43-22,88	14,16(4,04)	6,83-21,05	11,48(3,30)	7,32-19,39	11,26(3,16)
	h ^o	49,39-64,48	56,95(4,26)	45,39-100,36	59,48(11,9)	47,86-66,17	57,65(4,34)
	EW*	40,49-63,68	46,68(5,57)	34,39-59,11	43,98(6,85)	32,86-53,54	43,89(5,5)
	WIO	37,35-291,64	215,67(65,04)	98,32-396,98	257,27(88,16)	132,05-423,81	254,55(75,96)
Diente 1.2	L*	45,84-67,4	58,59(5,54)	34,74-65,48	55,47(8,89)	51,27-66,13	58,62(3,81)
	a*	5,08-10,88	7,69(1,79)	4,98-8,94	6,66(1,29)	4,09-8,52	6,19(1,49)
	b*	5,41-16,02	11,35(3,59)	5,47-16,59	9,72(2,95)	5,74-13,42	9,13(2,43)
	C*	7,42-18,72	13,74(3,87)	7,77-18,76	11,83(3,03)	7,12-15,44	11,08(2,67)
	h ^o	43,88-62,39	55,04(4,79)	40,68-62,17	54,81(5,59)	43,09-66,27	55,54(5,05)
	EW*	34,91-56,71	43,8(5,46)	38,06-65,9	46,28(8,24)	37,11-49,63	42,94(3,53)
	WIO	82,83-391,25	256,08(77,1)	50,18-334,36	231,98(93,17)	183,39-357,43	266,67(49,75)
Diente 1.3	L*	31,38-55,69	46,91(6,48)	33,53-65,28	46,53(8,83)	44,68-65,35	50,84(5,65)
	a*	8,04-13,45	9,95(1,57)	5,14-11,22	8,12(1,79)	6,11-10,17	7,6(1,17)
	b*	7,37-19,55	13,55(3,39)	3,83-17,64	10,88(3,35)	5,46-14,79	10,33(2,59)
	C*	10,91-23,02	16,86(3,46)	6,41-20,91	13,65(3,54)	9,25-17,77	12,88(2,56)
	h ^o	42,5-59,57	53,02(5,12)	36,67-60,71	52,32(6,51)	36,19-61,72	52,96(5,9)
	EW*	47,47-69,48	55,85(6,03)	37,88-66,78	55,41(7,97)	36,37-57,41	50,88(5,64)
	WIO	16,19-203,6	105,3(58,87)	22,73-340,57	123,77(86,57)	72,32-363,5	165,92(73,24)
Diente 2.1	L*	51,75-68,69	59,68(4,68)	48,88-71,91	60,6(6,41)	49,69-71,74	60,45(5,56)
	a*	4,64-10,01	7,2(1,59)	3,38-9,12	6,37(1,56)	3,24-9,32	6,19(1,58)
	b*	5,72-18,68	11,95(3,69)	5,34-17,84	9,64(3,96)	1,62-16,92	9,64(3,96)
	C*	8,08-21,19	14,0(3,84)	6,75-20,03	12,32(3,55)	5,11-19,03	11,65(3,69)
	h ^o	45,08-67,86	58,06(5,58)	43,01-67,88	57,98(6,05)	17,96-67,44	54,3(14,48)
	EW*	35,56- 49,04	42,89(4,17)	31,72-51,72	41,52(5,72)	33,16-51,89	41,45(5,03)
	WIO	172,03- 374,07	266,68(62,53)	173,34-455,43	291,03(82,53)	146,1- 432,7	291,74(77,07)
Diente 2.2	L*	46,96- 65,54	54,36(5,67)	37,62- 69,66	54,6(8,44)	39,38- 69,59	53,77(7,47)
	a*	5,62- 10,55	7,39(1,47)	4,34- 8,29	6,34(1,01)	3,95- 8,36	5,92(1,26)
	b*	5,64- 17,09	11,72(3,09)	5,99- 16,41	10,1(2,47)	5,84- 15,51	9,49(2,60)
	C*	7,97- 19,15	13,9(3,22)	8,22- 18,39	11,97(2,45)	7,43- 17,62	11,24(2,72)
	h ^o	45,06- 64,53	57,08(5,36)	45,96- 63,46	57,3(5,39)	45,95- 65,18	57,56(5,13)
	EW*	35,37- 54,32	47,87(5,18)	33,93-63,17	47,1(7,87)	35,14-61,11	47,75(6,76)
	WIO	119,24-384,72	199,05(71,65)	53,07-413,35	217,25(97,47)	83,96- 400,72	208,81(82,34)
Diente 2.3	L*	32,77- 53,51	42,71(5,56)	27,96- 57,99	44,02(7,78)	29,94- 71,29	44,66(9,69)
	a*	7,31- 13,35	9,21(1,57)	5,19- 16,45	7,96(2,65)	4,69- 9,11	6,59(1,29)
	b*	10,07- 19,12	13,3(2,41)	6,09- 16,49	10,85(2,75)	4,76- 15,99	9,85(2,76)
	C*	12,84- 22,3	16,23(2,53)	9,35- 18,89	13,62(3,14)	7,32- 18,39	11,89(2,86)
	h ^o	45,83- 63,08	55,09(4,86)	29,45- 62,25	53,87(8,48)	40,61- 65,06	55,44(5,46)
	EW*	48,97- 68,68	59,63(5,15)	46,06-72,78	57,8(6,86)	34,1-70,76	56,79(8,89)
	WIO	-3,61-180,54	62,87(48,53)	-18,44-259,69	95,9(67,16)	-1,93- 429,14	112,87(106,13)

Tabla IV.7. Rango de distribución, media y desviación estándar de los valores medios de L*, a*, b*, C*, h^o, EW* y WIO* medidos para cada diente en el grupo de pacientes tetraciclínicos.

Como podemos observar en las figuras IV.22. y IV.23., la tendencia que muestra el grupo de pacientes tetraciclínicos, en general, es a un aumento de la luminosidad y una disminución de las coordenadas cromáticas a^* y b^* .

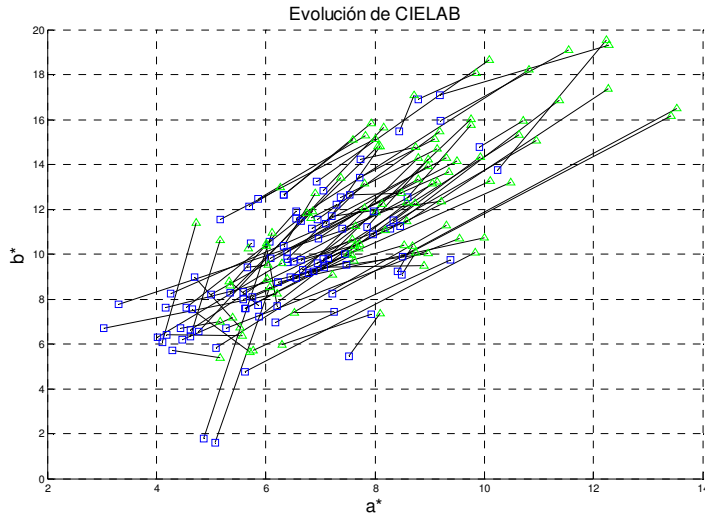


Figura IV.22. Vista parcial de los planos a^* y b^* de CIELAB de las mediciones de color.
Δ: medición inicial del color del diente; **□**: medición final del color del diente;
 -: trayectoria seguida por la variación del color.

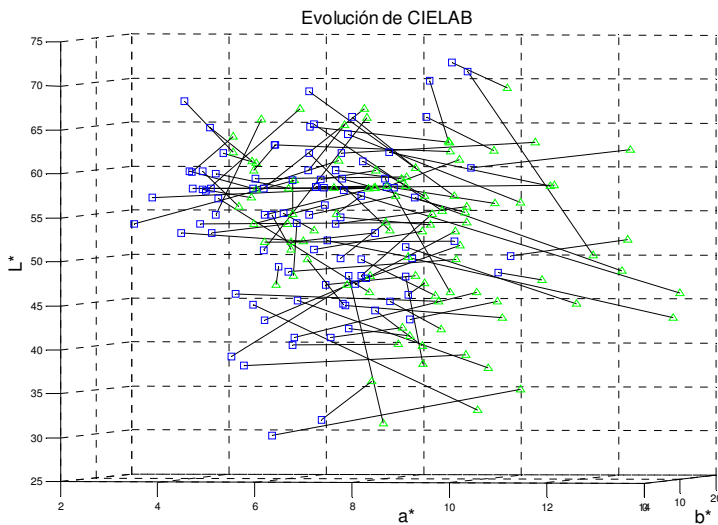


Figura IV.23. Vista parcial de los planos a^* y L^* de CIELAB de las mediciones de color.
Δ: medición inicial del color del diente; **□**: medición final del color del diente;
 -: trayectoria seguida por la variación del color.

A continuación se muestran la distribución de las variaciones de L^* , a^* , b^* y EW^* (ΔL^* , Δa^* , Δb^* y ΔEW^*), entre las mediciones realizadas antes y después del blanqueamiento (figuras IV.24. a IV.27).

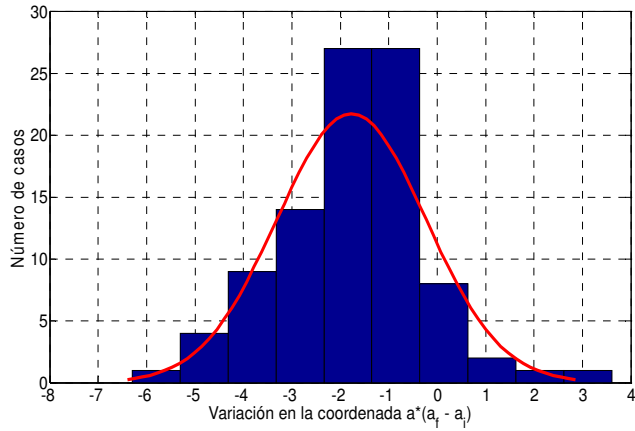


Figura IV.24. Histograma de las variaciones en la coordenada a^* (Δa^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.

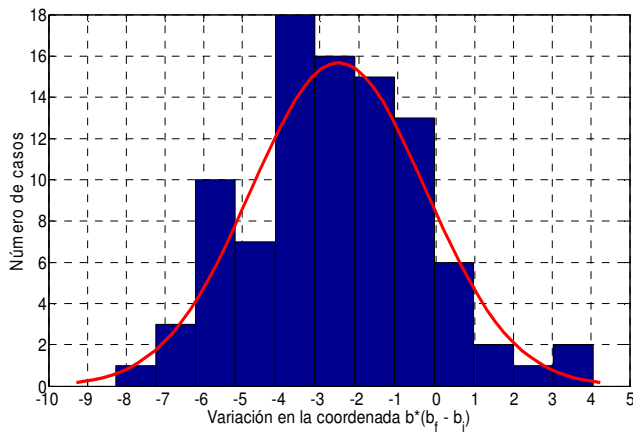


Figura IV.25. Histograma de las variaciones en la coordenada b^* (Δb^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.

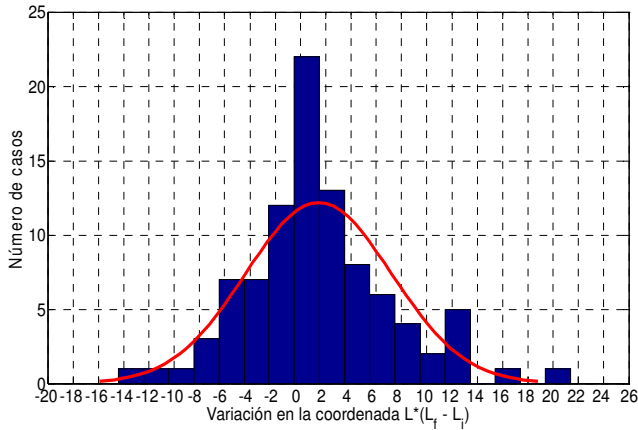


Figura IV.26. Histograma de las variaciones en la coordenada L^* (ΔL^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.

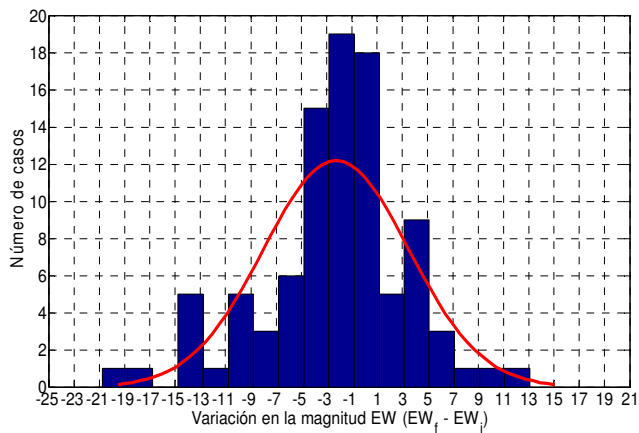


Figura IV.27. Histograma de las variaciones en EW^* (ΔEW^*) durante el tratamiento para todos los dientes en el grupo de pacientes tetraciclínicos.

Para este grupo de pacientes, los valores para L^* , a^* , b^* y EW^* reflejan igualmente una distribución normal de los mismos con medias y desviaciones típicas $(\mu, \sigma) = (1.3, 5.8)$, $(-1.8, 1.5)$, $(-2.6, 2.4)$ y $(-2.2, 5.8)$, respectivamente.

Estos histogramas muestran una tendencia similar de acercamiento a las coordenadas del blanco modelo $(100,0,0)$ tras el tratamiento blanqueador para los pacientes tetraciclínicos con respecto al grupo de pacientes normales. Para ambos casos, las medias de Δa^* y Δb^* fueron negativas mientras que para ΔL^* fueron

positivas. En cuanto a ΔEW^* , la variación media negativa también muestra la misma tendencia que en el grupo de pacientes normales.

En el caso de los pacientes con tinción por tetraciclinas, también existe una mayor dispersión de los datos para la coordenada L^* , frente a a^* y b^* , con una desviación estándar superior.

IV.1.3. Guía Vitapan Classical®

Al igual que para cada uno de los dientes objeto de estudio, para la especificación colorimétrica de la guía de color Vitapan Classical®, se realizaron tres mediciones por tablilla con el espectrorradiómetro SpectraScan PR-704® y la lámpara de iluminación Shade Light®. La tabla IV.8. muestra los valores medios de las coordenadas cromáticas a^* , b^* y L^* de cada una de las 16 tablillas de la guía en orden decreciente de luminosidad. Las irregularidades o saltos que aparecen para la coordenada L^* están dentro del error instrumental del aparato (5%).

Tablilla	a^*	b^*	L^*
B1	4,24	7,34	59,85
A1	5,05	9,11	63,46
B2	6,09	12,55	61,90
D2	5,59	8,59	59,41
A2	6,99	12,46	60,55
C1	5,15	8,81	55,87
C2	6,87	13,40	54,83
D4	6,18	14,40	55,57
D3	7,96	14,58	56,16
A3	7,19	11,69	55,65
B3	7,97	16,83	49,28
A3,5	8,49	15,70	48,94
B4	8,17	18,33	50,02
C3	6,78	12,88	46,29
A4	8,34	14,94	43,05
C4	7,23	12,87	34,92

Tabla IV.8. Valores medios de las coordenadas cromáticas en CIELAB de la guía Vitapan Classical®.

Las figuras IV.28. y IV.29. muestran la distribución de los datos colorimétricos pertenecientes a los dientes objeto de estudio (1.3 a 2.3) junto con la distribución de la guía Vitapan Classical® en el espacio CIELAB.

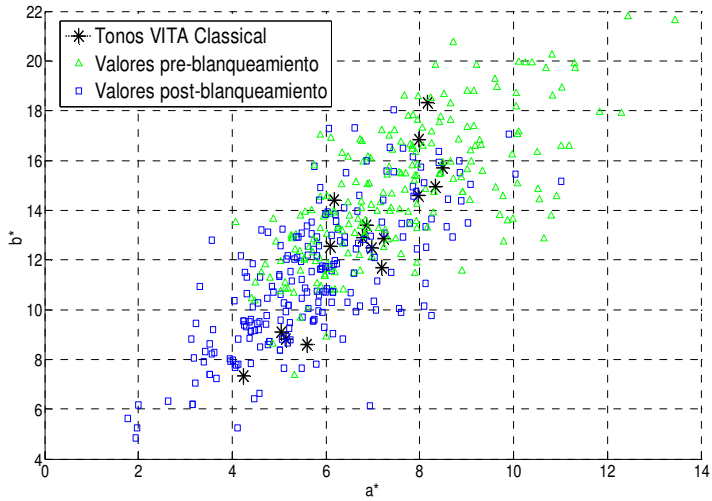


Figura IV.28. Representación de la distribución de los datos colorimétricos correspondientes a los dientes y las tabillas de la guía Vitapan Classical® en el plano a^*b^* .

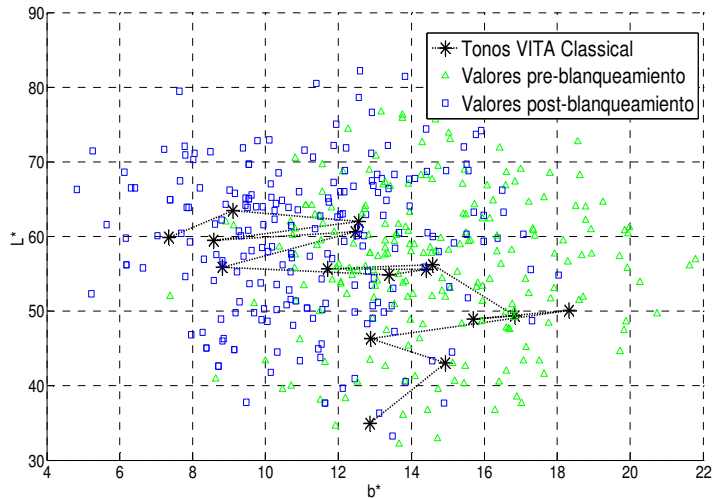


Figura IV.29. Representación de la distribución de los datos colorimétricos correspondientes a los dientes y las tabillas de la guía Vitapan Classical® en el plano b^*L^* .

Como se puede observar en las figuras anteriores, las coordenadas cromáticas en CIELAB de la guía Vitapan Classical® se encuentran en la misma zona del diagrama cromático donde se localizan los dientes objeto de estudio.

IV.2. Análisis estadístico sobre la influencia de variables exógenas en el proceso de blanqueamiento

En este apartado y como paso inicial en el análisis estadístico de los datos colorimétricos de nuestro estudio, expondremos los resultados obtenidos en relación con la influencia de variables cualitativas exógenas en el resultado final del tratamiento. En concreto, se pretende estimar si estos factores, que influyen en las propiedades ópticas iniciales del diente, tienen relevancia a la hora de construir modelos que permitan predecir el color final del diente.

Las variables exógenas que se analizaron en este apartado, todas ellas consideradas como hábitos pre-blanqueamiento (Anexo 4), se describieron en el anterior capítulo de la presente Memoria (figura III.6.). Se realizó un análisis de la varianza ANOVA tomando como variables dependientes Δa^* , Δb^* , ΔL^* y ΔEW^* y, como factores, dichas variables exógenas. Hay que tener en cuenta que el objeto de estudio en este análisis es el diente, mientras que los datos recogidos en la encuesta son referentes a los pacientes; por tanto, cada dato del estudio de hábitos se repite para cada diente del paciente correspondiente.

IV.2.1. ANOVA para Pacientes Normales

Al analizar los diferentes niveles de cada una de las variables exógenas encuestadas, es posible determinar su influencia sobre el proceso de blanqueamiento. La tabla IV.9. muestra los diferentes niveles y frecuencia de distribución de cada factor considerado para realizar el análisis ANOVA en el grupo

de pacientes normales (hay que tener en cuenta que la correspondencia entre niveles de los factores y “opciones” en la encuesta no es directa, para favorecer que los tamaños poblacionales sean similares).

Factores	Niveles de los factores			
A: alimentos	0 (no consume ninguno): 102 dientes	1 (toma 1 alimento): 78 dientes	2 (toma 2 ó más alimentos): 42 dientes	
B: bebidas carbónicas e isotónicas	0 (no toma): 138 dientes		1 (< de 3 veces /día): 84 dientes	
C: café, té e infusiones	0 (no toma): 24 dientes		1 (< de 3 veces /día): 198 dientes	
D: colutorios	0 (no utiliza): 174 dientes		1 (sí utiliza uno con CLX): 48 dientes	
E: edad	< de 35 años: 72 dientes	36-45 años: 60 dientes	46-56 años: 48 dientes	> de 57 años: 42 dientes
F: tabaco	0 (no ha fumado nunca) y 1 (ocasionalmente): 162 dientes		2 (< de 5 cigarrillos/día) y 3 (> de 5 cigarrillos/día): 60 dientes	
G: sexo	0 (mujer): 102 dientes		1 (hombre): 120 dientes	
H: vino	0 (no toma): 168 dientes	1 (toma 1 copa/día) y 2 (toma 2 o más copas/día): 54 dientes		

Tabla IV.9. Niveles y distribución de frecuencias de los factores exógenos para el grupo de pacientes normales.

Las siguientes tablas (de la IV.10. a la IV.13.) muestran el análisis de la varianza de ocho factores (variables exógenas), para el conjunto de datos en este mismo grupo de estudio.

De toda la información presente en la tabla ANOVA, la de mayor interés es la relativa al “Cociente F” y al “P valor”. Si los valores de P son menores que un valor crítico (α) establecido por el investigador, entonces el efecto se considerará significativo. En la práctica lo usual es un nivel de significación de 0.05 ó 0.01, si bien se usan otros valores. Si, por ejemplo, se escoge un nivel de significación del 1% ó 0.01 al diseñar una regla de decisión entonces hay una oportunidad entre cien de rechazar la hipótesis cuando debiera haberse aceptado; es decir, tenemos un 99% de confianza de que hemos adoptado la decisión correcta. En tal caso decimos que la hipótesis ha sido rechazada al nivel de significación del 0.01, lo cual quiere

decir que la hipótesis tiene una probabilidad del 1% de ser falsa. El valor establecido en nuestro estudio es 0.01, así valores inferiores a éste, implicarán que los valores medios de la variable dependiente difieren más de lo que se esperaría de forma aleatoria.

El análisis ANOVA para las variables dependientes Δa^* , Δb^* , ΔL^* y ΔEW^* , se muestra de la tabla IV.10. a la IV.13.

Análisis de la Varianza para Δa^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	11,031	2	5,516	2,11	0,123
B	2,349	1	2,349	0,90	0,344
C	77,859	1	77,859	29,84	0,000
D	0,106	1	0,106	0,04	0,841
E	84,099	3	28,032	10,74	0,000
F	0,694	1	0,694	0,27	0,607
G	0,261	1	0,261	0,10	0,752
H	13,900	1	13,900	5,33	0,022
RESIDUOS	542,723	208	2,609		
TOTAL (CORREGIDO)	809,113	219			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.10. Análisis ANOVA para Δa^* (A: alimentos; B: bebidas carbónicas e isotónicas; C: café, té e infusiones; D: colutorio; E: edad; F: tabaco; G: sexo; H: vino).

Análisis de la Varianza para Δb^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	2,309	2	1,154	0,25	0,778
B	20,913	1	20,913	4,56	0,034
C	16,087	1	16,087	3,51	0,063
D	20,382	1	20,382	4,44	0,036
E	263,246	3	87,749	19,12	0,000
F	0,798	1	0,798	0,17	0,677
G	3,133	1	3,133	0,68	0,409
H	58,123	1	58,123	12,67	0,001
RESIDUOS	954,526	208	4,589		
TOTAL (CORREGIDO)	1401,81	219			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.11. Análisis ANOVA para Δb^* (A: alimentos; B: bebidas carbónicas e isotónicas; C: café, té e infusiones; D: colutorio; E: edad; F: tabaco; G: sexo; H: vino).

Análisis de la Varianza para ΔL^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	507,47	2	253,735	5,26	0,006
B	498,003	1	498,003	10,31	0,002
C	6,016	1	6,016	0,12	0,724
D	33,375	1	33,375	0,69	0,407
E	468,125	3	156,042	3,23	0,023
F	6,809	1	6,809	0,14	0,708
G	106,44	1	106,44	2,20	0,139
H	270,844	1	270,844	5,61	0,019
RESIDUOS	10042,7	208	48,282		
TOTAL (CORREGIDO)	11629,3	219			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.12. Análisis ANOVA para ΔL^* (A: alimentos; B: bebidas carbónicas e isotónicas; C: café, té e infusiones; D: colutorio; E: edad; F: tabaco; G: sexo; H: vino).

Análisis de la Varianza para ΔEW^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	454,361	2	227,18	5,58	0,004
B	349,367	1	349,367	8,57	0,004
C	22,303	1	22,303	0,55	0,460
D	17,487	1	17,487	0,43	0,513
E	357,856	3	119,285	2,93	0,035
F	6,898	1	6,898	0,17	0,681
G	68,474	1	68,474	1,68	0,196
H	141,442	1	141,442	3,47	0,064
RESIDUOS	8475,65	208	40,748		
TOTAL (CORREGIDO)	9695,64	219			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.13. Análisis ANOVA para ΔEW^* (A: alimentos; B: bebidas carbónicas e isotónicas; C: café, té e infusiones; D: colutorio; E: edad; F: tabaco; G: sexo; H: vino).

IV.2.2. ANOVA para Pacientes Tetraciclínicos

La tabla IV.14. muestra los diferentes niveles y distribución de frecuencias de cada factor considerado para realizar el análisis ANOVA en el grupo de pacientes tetraciclínicos. Obsérvese que los grados de libertad para este grupo de pacientes difieren levemente respecto a los de los pacientes normales para adaptarlos a las características de los datos disponibles.

Factores	Niveles de los factores		
	0 (no consume ninguno): 42 dientes	1 (toma 1 alimento): 42 dientes	2 (toma 2 ó más alimentos): 12 dientes
A: alimentos	0 (no toma): 72 dientes	1 (< de 3 veces/día): 24 dientes	
B: bebidas carbónicas e isotónicas	0 (no toma): 24 dientes	1 (< de 3 veces/día): 72 dientes	
C: café, té e infusiones	0 (no utiliza): 84 dientes	1 (sí utiliza uno con CLX): 12 dientes	
D: colutorios	< de 40 años: 48 dientes	≥ a 40 años: 48 dientes	
E: edad	0 (no ha fumado nunca) y 1 (ocasionalmente): 54 dientes	2 (< de 5 veces/día) y 3 (> de 5 veces/día): 42 dientes	
F: tabaco	0 (mujer): 30 dientes	1 (hombre): 66 dientes	
G: sexo	0 (no toma): 72 dientes	1 (toma 1 copa/día) y 2 (toma 2 o más copas/día): 24 dientes	
H: vino			

Tabla IV.14. Niveles y distribución de frecuencias de los factores exógenos para el grupo de pacientes tetraciclínicos.

El análisis ANOVA para las variables dependientes Δa^* , Δb^* , ΔL^* y ΔEW^* , se muestra de la tabla IV.15. a la IV.18.

Análisis de la Varianza para Δa^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	4,982	2	2,491	1,69	0,189
B	0,992	1	0,992	0,68	0,414
C	0,323	1	0,323	0,22	0,641
D	23,189	1	23,189	15,77	0,000
E	1,851	1	1,851	1,26	0,265
F	20,565	1	20,565	13,99	0,000
G	6,966	1	6,966	4,74	0,032
H	13,700	1	13,700	9,32	0,003
RESIDUOS	126,429	86	1,470		
TOTAL (CORREGIDO)	222,137	95			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.15. Análisis ANOVA para Δa^* (**A:** alimentos; **B:** bebidas carbónicas e isotónicas; **C:** café, té e infusiones; **D:** colutorio; **E:** edad; **F:** tabaco; **G:** sexo; **H:** vino).

Análisis de la Varianza para Δb^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	13,299	2	6,649	1,73	0,183
B	22,011	1	22,011	5,73	0,019
C	4,137	1	4,137	1,08	0,302
D	83,431	1	83,431	21,72	0,000
E	3,798	1	3,798	0,99	0,323
F	0,269	1	0,269	0,07	0,792
G	14,179	1	14,179	3,69	0,058
H	59,866	1	59,866	15,59	0,000
RESIDUOS	330,304	86	3,841		
TOTAL (CORREGIDO)	534,384	95			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.16. Análisis ANOVA para Δb^* (A: alimentos; B: bebidas carbónicas e isotónicas; C: café, té e infusiones; D: colutorio; E: edad; F: tabaco; G: sexo; H: vino).

Análisis de la Varianza para ΔL^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	235,368	2	117,684	4,49	0,014
B	0,344	1	0,344	0,01	0,909
C	1,197	1	1,197	0,05	0,831
D	216,826	1	216,826	8,27	0,005
E	196,756	1	196,756	7,50	0,008
F	67,664	1	67,664	2,58	0,112
G	164,283	1	164,283	6,26	0,014
H	1,124	1	1,124	0,04	0,837
RESIDUOS	2255,94	86	26,232		
TOTAL (CORREGIDO)	3203,43	95			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.17. Análisis ANOVA para ΔL^* (A: alimentos; B: bebidas carbónicas e isotónicas; C: café, té e infusiones; D: colutorio; E: edad; F: tabaco; G: sexo; H: vino).

Análisis de la Varianza para ΔEW^* - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A	230,012	2	115,006	4,43	0,015
B	0,361	1	0,361	0,01	0,906
C	4,751	1	4,751	0,18	0,669
D	137,56	1	137,56	5,30	0,024
E	187,031	1	187,031	7,20	0,009
F	52,691	1	52,691	2,03	0,158
G	130,67	1	130,67	5,03	0,027
H	10,841	1	10,841	0,42	0,519
RESIDUOS	2232,46	86	25,959		
TOTAL (CORREGIDO)	3158,72	95			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla IV.18. Análisis ANOVA para ΔEW^* (A: alimentos; B: bebidas carbónicas e isotónicas; C: café, té e infusiones; D: colutorio; E: edad; F: tabaco; G: sexo; H: vino).

De acuerdo a los resultados obtenidos, para los pacientes normales la variable “edad” influye en la variación de las coordenadas cromáticas (Δa^* y Δb^*) y sobre la variación en la luminosidad e índice EW^* influye la ingestión de bebidas carbónicas e isotónicas. En el caso de los pacientes tetraciclínicos, solamente el uso de colutorio influye en cada una de las variables dependientes.

IV.3. Modelos lineales para la predicción del cambio cromático en el espacio CIELAB

A continuación se muestran los modelos lineales obtenidos para el análisis de la variación cromática durante el proceso de blanqueamiento. Se diseñaron modelos lineales multivariados para predecir el color final en el espacio CIELAB (a^*_f, b^*_f, L^*_f) y el valor del índice de blanqueamiento EW^*_f a partir de los valores a^* , b^* y L^* previos al blanqueamiento (a^*_i, b^*_i, L^*_i). Igualmente, se diseñaron modelos lineales univariados para predecir la variación del EW^* , del croma C^* y del ángulo de tono h° a partir de sus correspondientes valores iniciales (EW^*_i, C^*_i y h°_i). En este sentido, queremos señalar que no se han diseñado modelos multivariados

para el croma C^* y el ángulo de tono h° dada la dependencia de éstos con las coordenadas a^* y b^* .

IV.3.1. Modelos lineales para Pacientes Normales

IV.3.1.1. Modelos lineales multivariantes

Los modelos lineales multivariantes para predecir a^*_f , b^*_f , L^*_f y EW^*_f se muestran en la tabla IV.19.

Modelo Multivariable					R ²	Error Estándar
$a^*_f = 3.00 - 0.019 \times L^*_i + 0.23 \times a^*_i + 0.14 \times b^*_i$ (IV.1.)					0.23	1.41
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [1.47, 4.53]	Térm. L^*_i [-0.039, 0.0003]	Térm. a^*_i [0.11, 0.35]	Térm. b^*_i [0.052, 0.23]		
$b^*_f = 5.92 - 0.047 \times L^*_i - 0.20 \times a^*_i + 0.64 \times b^*_i$ (IV.2.)					0.35	2.15
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [3.57, 8.29]	Térm. L^*_i [-0.077, -0.017]	Térm. a^*_i [-0.39, -0.018]	Térm. b^*_i [0.51, 0.78]		
$L^*_f = 20.36 + 0.73 \times L^*_i - 0.046 \times a^*_i - 0.14 \times b^*_i$ (IV.3.)					0.53	6.72
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [13.0, 27.73]	Térm. L^*_i [0.64, 0.83]	Térm. a^*_i [-0.62, 0.53]	Térm. b^*_i [-0.57, 0.28]		
$EW^*_f = 77.74 - 0.71 \times L^*_i + 0.01 \times a^*_i + 0.35 \times b^*_i$ (IV.4.)					0.55	6.21
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [70.92, 84.55]	Térm. L^*_i [-0.80, -0.62]	Térm. a^*_i [-0.53, 0.54]	Térm. b^*_i [-0.036, 0.74]		

Tabla IV.19. Modelos multivariantes para a^*_f , b^*_f , L^*_f y EW^*_f con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R²) y error estándar (ecuaciones (IV.1.), (IV.2.), (IV.3.) y (IV.4.), respectivamente).

Los coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* se muestran en la tabla IV.20.. El coeficiente de correlación entre EW^*_f y L^*_i fue muy fuerte y negativo, mientras que fue débil y positivo con a^*_i y b^*_i . Para L^*_f , la correlación con respecto a L^*_i fue fuerte y positiva, mientras que con a^*_i y b^*_i fue débil y negativa. En relación a a^*_f , los coeficientes obtenidos muestran una correlación débil y negativa con respecto a L^*_i y positiva y relativamente alta con respecto a a^*_i y b^*_i . Para b^*_f , la correlación con respecto a L^*_i es insignificante, mientras que para a^*_i y b^*_i fueron positivas, siendo considerablemente más fuerte con b^*_i que con a^*_i .

Coef. Corr.	L^*_f	a^*_f	b^*_f	EW^*_f
L^*_f	0.73	-0.17	0.001	-0.75
a^*_f	-0.069	0.43	0.17	0.10
b^*_f	-0.039	0.39	0.43	0.096

Tabla IV.20. Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* , para pacientes normales.

IV.3.1.2. Modelos lineales univariables

La tabla IV.21. muestra los modelos lineales univariables para predecir el valor post-blanqueamiento y la variación de las magnitudes EW^* , C^* , h^o y L^* tras el tratamiento blanqueador.

Modelo Univariante			R^2	Error Estándar
$EW^*_f = 7.03 + 0.76 \times EW^*_i$ (IV.5.) $\Delta EW^* = [EW^*_f - EW^*_i] = 7.03 - 0.24 \times EW^*_i$ (IV.6.)			0.55	6.23
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [2.59, 11.48]	Térm. EW^*_i [0.67, 0.86]	0.11	
$C^*_f = 4.20 + 0.5 \times C^*_i$ (IV.7.) $\Delta C^* = [C^*_f - C^*_i] = 4.20 - 0.49 \times C^*_i$ (IV.8.)			0.28	
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [2.40, 6.20]	Térm. C^*_i [0.39, 0.61]	0.26	2.53
$h^o_f = 22.3 + 0.65 \times h^o_i$ (IV.9.) $\Delta h^o = [h^o_f - h^o_i] = 22.3 - 0.35 \times h^o_i$ (IV.10.)			0.30	3.86°
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [13.95, 30.64]	Térm. h^o_i [0.51, 0.78]	0.11	
$L^*_f = 17.9 + 0.73 \times L^*_i$ (IV.11.) $\Delta L^* = [L^*_f - L^*_i] = 17.9 - 0.27 \times L^*_i$ (IV.12.)			0.52	
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [12.50, 23.3]	Térm. L^*_i [0.64, 0.83]	0.12	6.77

Tabla IV.21. Modelos univariables para EW^*_f , C^*_f , h^o_f y L^*_f con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R^2) y error estándar (ecuaciones (IV.5.), (IV.6.), (IV.7.), (IV.8.), (IV.9.), (IV.10.), (IV.11.) y (IV.12.), respectivamente).

Los valores bajos del coeficiente de determinación (R^2) en algunas de las ecuaciones vienen explicados, en parte, por la proximidad a cero de los valores registrados.

De acuerdo a las ecuaciones (IV.5) y (IV.6.), el valor de la pendiente, menor de la unidad, parece indicar que las variaciones que se producen en el índice de

blanqueamiento (ΔEW^*) serán menores para los dientes que presenten menor índice de blanqueamiento inicial. Esto se observa más claramente en el modelo univariable equivalente dado en la ecuación (IV.6.), que predice la variación del índice de blanqueamiento (ΔEW^*) como una función de su valor inicial (figura IV.30.). Este modelo lineal muestra una correlación negativa ($r=-0.33$) entre el valor ΔEW^*_i previo al blanqueamiento y la variación efectiva tras el tratamiento. Esto es, los dientes más acromáticos mostraron una menor variación efectiva en este índice. Nótese que en la figura IV.30., un valor negativo en el eje Y (un valor negativo de variación de EW^*) apunta a un acercamiento al blanco modelo (100,0,0) y, por tanto, a un blanqueamiento efectivo.

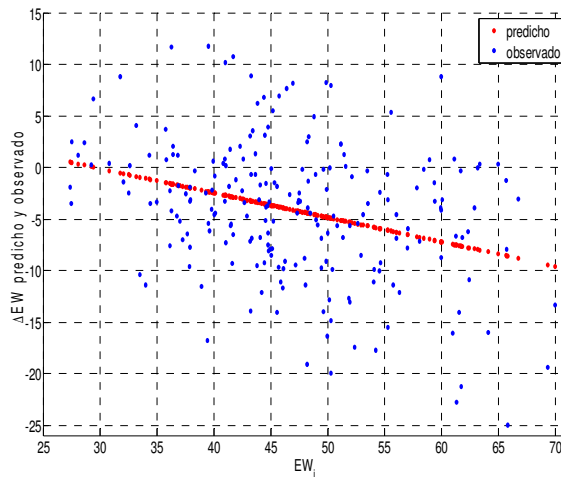


Figura IV.30. Variación del índice de blanqueamiento EW^* en función del valor inicial para dicho índice, y aproximación del modelo lineal univariable para pacientes normales (ecuación (IV.6.)).

Tanto el *croma* como el *tono* son dos aspectos visuales del color. Como se ha comentado anteriormente, el *croma* (*chroma*, C^*) es la saturación del color mientras que el *tono* (*hue*, h^a) se define como el nombre del color, correspondiente a la longitud de onda de la luz (Joiner, 2004). Las ecuaciones (IV.7.) y (IV.8.) muestran un regresor lineal univariable que evalúa la variación en el *croma* tras el proceso de blanqueamiento dental. La figura IV.31. muestra las variaciones registradas en el *croma* tras el proceso de blanqueamiento, para todos los dientes en el grupo de

pacientes normales, como una función del valor inicial del mismo, C_i^* , junto con la aproximación a esos valores usando el regresor lineal. La tendencia para el *croma* es similar a la observada en el índice de blanqueamiento EW^* , aunque más acusada y muestra que los dientes más saturados (con mayor C_i^*) se desaturan más que aquellos dientes que presentan una menor saturación inicial.

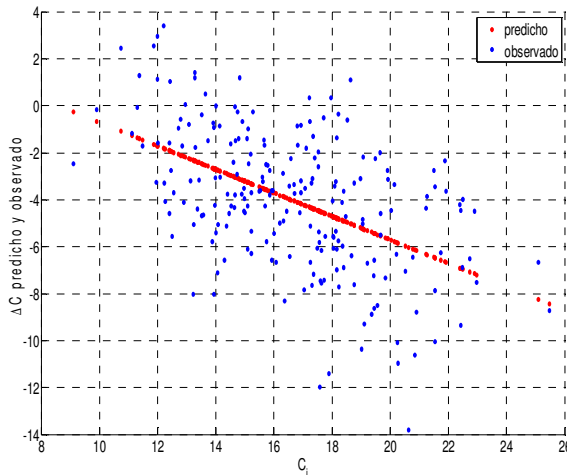


Figura IV.31. Variación del croma C^* en función de su valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes normales (ecuación (IV.8)).

Del mismo modo, las ecuaciones (IV.9.) y (IV.10.) definen un modelo lineal univariable que evalúa la variación en el *tono* tras del proceso de blanqueamiento. La figura IV.33. muestra las variaciones registradas para el *tono*, para todos los valores tras el blanqueamiento, como una función del *tono* inicial, h_i^o , junto con la aproximación a esos valores usando el regresor lineal.

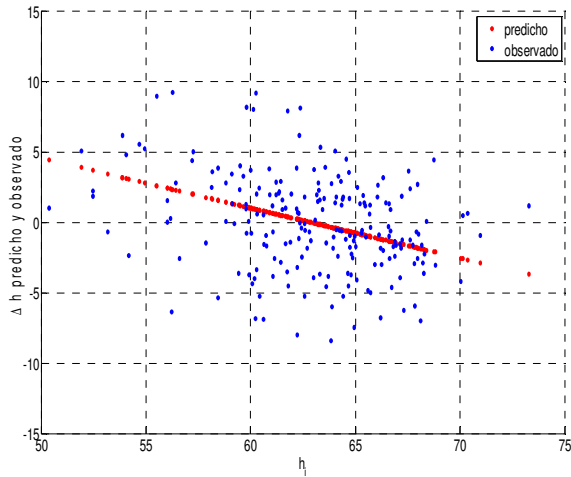


Figura IV.32. Variación del tono h^p en función de su valor inicial y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes normales (ecuación (IV.10)).

Las ecuaciones (IV.11.) y (IV.12.) definen un modelo lineal univariable que evalúa la variación en la *luminosidad* (L^*) tras del proceso de blanqueamiento. Al igual que para los parámetros anteriores, la figura IV.33. muestra las variaciones registradas para L^* , para todos los valores tras el blanqueamiento, como una función de L^*_i junto con la aproximación a esos valores usando el regresor lineal.

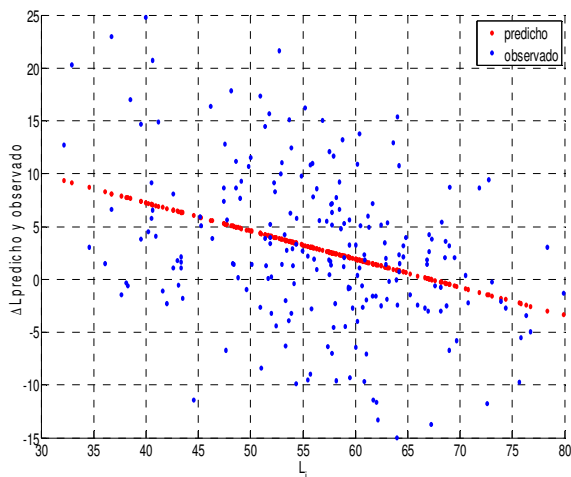


Figura IV.33. Variación de la luminosidad L^* en función de su valor inicial y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes normales (ecuación (IV.12.)).

IV.3.2. Modelos lineales para Pacientes Tetraciclínicos

IV.3.2.1. Modelos lineales multivariantes

Los modelos lineales multivariantes para predecir a^*_f , b^*_f , L^*_f y EW^*_f se muestran en la tabla IV.22.

Modelo Multivariable					R ²	Error Estándar
$a^*_f = 3.2 - 0.014 \times L^*_i + 0.37 \times a^*_i + 0.07 \times b^*_i$ (IV.13.)					0.41	1.17
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [0.97, 5.43]	Térm. L [*] _i [-0.045, 0.019]	Térm. a [*] _i [0.16, 0.59]	Térm. b [*] _i [-0.045, 0.19]		
$b^*_f = 2.99 - 0.0037 \times L^*_i - 0.24 \times a^*_i + 0.72 \times b^*_i$ (IV.14.)					0.53	1.99
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [-0.82, 6.79]	Térm. L [*] _i [-0.059, 0.051]	Térm. a [*] _i [-0.60, 0.12]	Térm. b [*] _i [0.52, 0.92]		
$L^*_f = 10.57 + 0.74 \times L^*_i - 0.37 \times a^*_i + 0.62 \times b^*_i$ (IV.15.)					0.61	5.32
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [0.43, 20.71]	Térm. L [*] _i [0.59, 0.89]	Térm. a [*] _i [-1.33, 0.59]	Térm. b [*] _i [0.09, 1.15]		
$EW^*_f = 87.13 - 0.71 \times L^*_i + 0.37 \times a^*_i - 0.41 \times b^*_i$ (IV.16.)					0.60	5.13
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep. [77.34, 96.91]	Térm. L [*] _i [-0.85, -0.57]	Térm. a [*] _i [-0.56, 1.29]	Térm. b [*] _i [-0.92, 0.103]		

Tabla IV.22. Modelos multivariantes para a^*_f , b^*_f , L^*_f y EW^*_f con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R²) y error estándar (ecuaciones (IV.13.), (IV.14.), (IV.15.) y (IV.16.), respectivamente).

Los coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^*_f , L^*_f , a^*_f y b^*_f se muestran en la tabla IV.23. En general, los coeficientes para los pacientes tetraciclínicos son muy similares a los obtenidos para los pacientes normales, con algunas excepciones como la correlación entre EW^*_f y b^*_f , que fue débil y negativa, mientras que fue débil y positiva entre L^*_f y b^*_f .

Coef. Corr.	L^*_f	a^*_f	b^*_f	EW^*_f
L^*_f	0.757	-0.219	0.031	-0.766
a^*_f	-0.114	0.628	0.481	0.177
b^*_f	0.177	0.529	0.718	-0.099

Tabla IV.23. Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^*_f , L^*_f , a^*_f y b^*_f , para pacientes tetraciclínicos.

IV.3.2.2. Modelos lineales univariables

Asimismo, se construyeron modelos lineales univariables para predecir el valor post-blanqueamiento, esto es, la variación de las magnitudes EW^* , C^* , h^o y L^* tras el tratamiento blanqueador (tabla IV.24.).

Modelo Univariante			R ²	Error Estándar
$EW^*_f = 10.99 + 0.73 \times EW^*_i$ (IV.17.) $\Delta EW^* = [EW^*_f - EW^*_i] = 10.99 - 0.27 \times EW^*_i$ (IV.18.)			0.55	5.38
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep.	Térm. EW^*_i	0.14	
	[4.19, 17.78]	[0.59, 0.87]		
$C^*_f = 3.20 + 0.57 \times C^*_i$ (IV.19.) $\Delta C^* = [C^*_f - C^*_i] = 3.20 - 0.43 \times C^*_i$ (IV.20.)			0.50	2.09
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep.	Térm. C^*_i	0.36	
	[2.40, 6.20]	[0.39, 0.61]		
$h^o_f = 20.63 + 0.63 \times h^o_i$ (IV.21.) $\Delta h^o = [h^o_f - h^o_i] = 20.63 - 0.37 \times h^o_i$ (IV.22.)			0.19	4°
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep.	Térm. h^o_i	0.07	
	[5.39, 35.87]	[0.35, 0.90]		
$L^*_f = 13.2 + 0.78 \times L^*_i$ (IV.23.) $\Delta L^* = [L^*_f - L^*_i] = 13.3 - 0.22 \times L^*_i$ (IV.24.)			0.57	5.44
Intervalos de confianza 95%	Térm. Indep.	Térm. h^o_i	0.11	
	[5.93, 20.62]	[0.64, 0.91]		

Tabla IV.24. Modelos univariables para EW^*_f , C^*_f , h^o_f y L^*_f , con intervalos de confianza para los coeficientes, coeficientes de determinación (R^2) y error estándar (ecuaciones (IV.17.), (IV.18.), (IV.19.), (IV.20.), (IV.21.), (IV.22.), (IV.23.) y (IV.24.), respectivamente).

Las ecuaciones anteriores (de (IV.17.) a (IV.24.)) definen los modelos lineales univariables, para el grupo de pacientes tretraciclínicos, que evalúan la variación en EW^* , C^* , h^o y L^* , respectivamente, tras del proceso de blanqueamiento dental. Como podemos observar, estos modelos presentan tendencias similares a los obtenidos para los pacientes normales.

Las figuras IV.34., IV.35., IV.36. y IV.37. muestran la forma de los modelos lineales construidos conforme al comportamiento de los datos disponibles. En general, los coeficientes de determinación que presentan estos modelos son ligeramente superiores a los que encontramos para los pacientes normales; esto puede ser debido al comportamiento de este índice ante un menor volumen de datos disponibles para este grupo de pacientes.

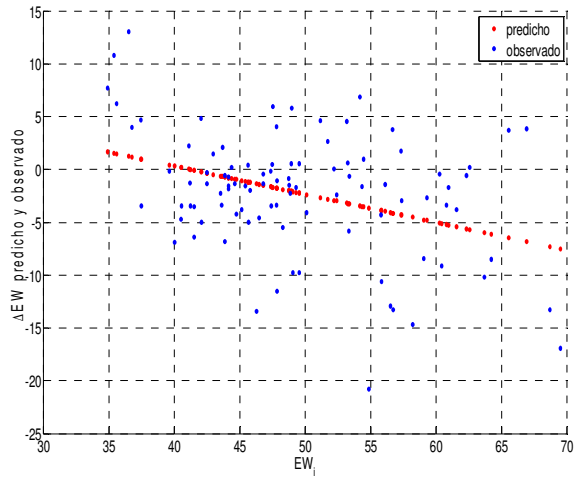


Figura IV.34. Variación del índice de blanqueamiento EW^* en función de su valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos (ecuación (IV.18)).

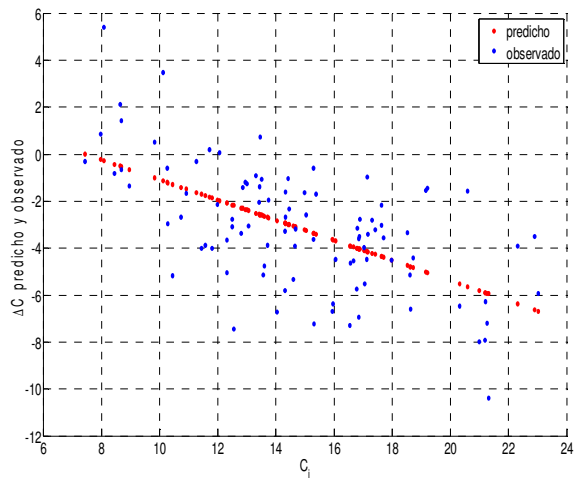


Figura IV.35. Variación del cromatismo C^* en función del valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos (ecuación (IV.20)).

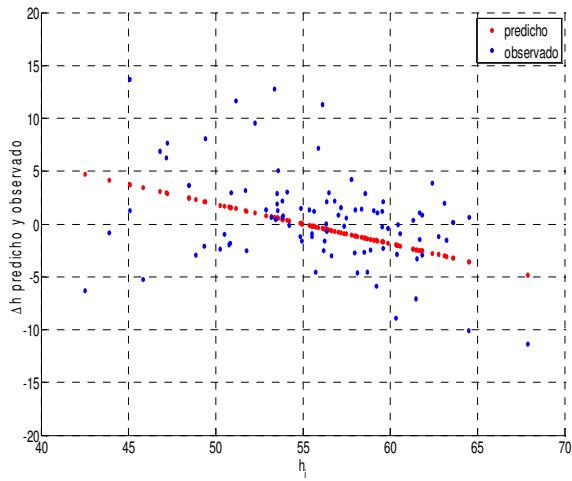


Figura IV.36. Variación del tono h^e en función del valor inicial, y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos (ecuación (IV.22.)).

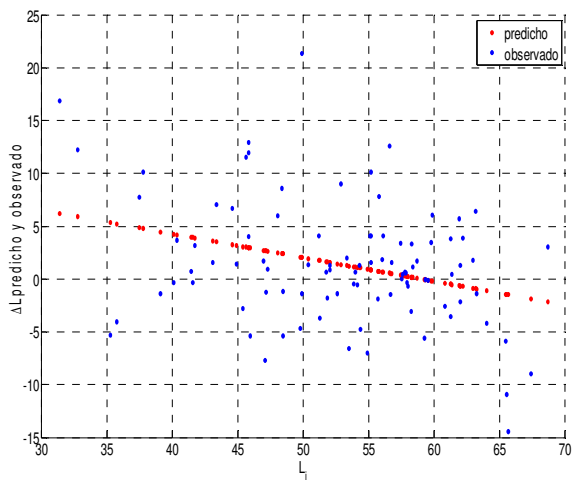


Figura IV.37. Variación de la luminosidad L^* en función de su valor inicial y aproximación del modelo lineal univariable anterior para pacientes tetraciclínicos (ecuación (IV.24.)).

IV.4. Lógica difusa para la predicción del cambio cromático tras el blanqueamiento dental

IV.4.1. Enfoque difuso para la identificación de tonos VITA en CIELAB e Inferencia difusa para la predicción del cambio cromático

Un *conjunto difuso* se define por una *función de pertenencia*, la cual asigna un valor de pertenencia a un dato cualquiera en su dominio. Este trabajo definirá conjuntos difusos en el espacio CIELAB correspondientes a los tonos de la guía Vitapan Classical[®] (tonos VITA), centrados en sus respectivos valores medidos en coordenadas CIELAB. Las coordenadas cromáticas en CIELAB de un diente cualquiera tendrán un cierto valor de pertenencia con respecto a un tono de la guía de color, que dependerá de la función de pertenencia diseñada para ese tono. Aquellos dientes que presenten un tono cercano a los valores CIELAB de una tablilla de la guía Vitapan Classical[®] tendrán un valor alto de pertenencia, mientras que los tonos dentales más alejados tendrán un valor de pertenencia bajo o nulo.

Estos conjuntos difusos se utilizaron como antecedentes en un conjunto de reglas difusas, cuyos consecuentes definen el color CIELAB post-blanqueamiento esperado para cada tono pre-blanqueamiento especificado en el antecedente. Los valores de los consecuentes se obtuvieron en un proceso de entrenamiento a partir de un conjunto de muestras de entrada/salida, que son, para los dientes objeto de estudio, los valores en CIELAB post-blanqueamiento (salida) y sus respectivos valores en CIELAB pre-blanqueamiento (entrada). El objetivo del proceso de inferencia difusa diseñado es modelar el comportamiento del proceso de blanqueamiento dental a través del conjunto de reglas descrito.

La obtención de reglas significativas del proceso que se está modelando no es, sin embargo, algo inherente a cualquier sistema difuso diseñado a partir de un conjunto de muestras. En el proceso de entrenamiento de un sistema difuso es relevante la interrelación entre las reglas componentes del modelo, y los valores de los consecuentes dependen, en gran parte, del solapamiento que pueda haber

entre las funciones de pertenencia de sus antecedentes. Para evitar esta dependencia, se ha diseñado un proceso modificado de inferencia, que rectifica la interacción entre las reglas para evitar su solapamiento, y que está inspirado en trabajos previos para sistemas difusos con particionamiento del espacio de entrada basado en *rejilla (grid)* (Herrera y cols., 2005; Herrera y cols., 2009) (apartado IV.4.1.2.).

IV.4.1.1. Establecimiento del problema y diseño de reglas difusas

Las variables de entrada del modelo serán los valores pre-blanqueamiento en CIELAB $\bar{x} = \{L_i^*, a_i^*, b_i^*\}$. El sistema de inferencia diseñado obtiene, para una entrada dada, una *estimación* de los valores CIELAB post-blanqueamiento $\tilde{y}(\bar{x}) = \{\tilde{L}_f^*(\bar{x}), \tilde{a}_f^*(\bar{x}), \tilde{b}_f^*(\bar{x})\}$. Los conjuntos difusos en CIELAB diseñados $\mu_i(\bar{x})$, que se obtienen mediante la T-norma producto de los conjuntos respectivos en las tres dimensiones L^* , a^* y b^* , $\mu(\bar{x}) = \mu_{L^*}(\bar{x}) \cdot \mu_{a^*}(\bar{x}) \cdot \mu_{b^*}(\bar{x})$, serán los antecedentes del conjunto de reglas del modelo. Las reglas tendrán, por tanto, la siguiente forma (para un tono VITA S), utilizando el *modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK)*:

$$\begin{aligned} \text{SI } L_i^* \text{ es } \mu_{L^*}^{VITAS} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \mu_{a^*}^{VITAS} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \mu_{b^*}^{VITAS} \text{ ENTONCES} \\ L_f^* = \tilde{L}_f^{*S} \text{ Y } a_f^* = \tilde{a}_f^{*S} \text{ Y } b_f^* = \tilde{b}_f^{*S} \end{aligned} \quad (\text{IV.25.})$$

donde $\mu_{L^*}^{VITAS}$, $\mu_{a^*}^{VITAS}$ y $\mu_{b^*}^{VITAS}$ son las funciones de pertenencia centradas en los valores correspondientes del tono S para las coordenadas L^* , a^* y b^* (tabla IV.8.). Los parámetros consecuentes \tilde{L}_f^{*S} , \tilde{a}_f^{*S} y \tilde{b}_f^{*S} es, por tanto, deseable y esperable que correspondan con el valor en CIELAB post-blanqueamiento *esperado* para el tono VITA S .

Las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos en los antecedentes de las reglas se consideraron gaussianas. Así, su forma para cada conjunto difuso en las coordenadas CIELAB L^* , a^* y b^* , para un tono genérico VITA S , viene dada por las ecuaciones (una por cada dimensión):

$$\mu_{L_i^*}^{VITAS}(L_i^*) = e^{-\frac{(L_i^* - L^*(S))^2}{2\sigma^S}}, \mu_{a_i^*}^{VITAS}(a_i^*) = e^{-\frac{(a_i^* - a^*(S))^2}{2\sigma^S}}, \mu_{b_i^*}^{VITAS}(b_i^*) = e^{-\frac{(b_i^* - b^*(S))^2}{2\sigma^S}}, \quad (\text{IV.26.})$$

siendo $\{L^*(S), a^*(S), b^*(S)\}$ las coordenadas en CIELAB para el tono S , y σ^S los radios de las respectivas funciones gaussianas. Para obtener un particionamiento del espacio de entrada justo, se ajustaron los radios σ^S de todas las funciones de pertenencia según la distancia al centro más cercano en el espacio tridimensional (Moody y Darken, 1989).

IV.4.1.2. Optimización de sistemas difusos: enfoque para la obtención de modelado local y global simultáneo

La función de salida de un *modelo difuso TSK* se calcula según la siguiente ecuación:

$$\tilde{y}(\vec{x}) = \frac{\sum_{k=1}^K \mu^k(\vec{x}) \tilde{y}^k}{\sum_{k=1}^K \mu^k(\vec{x})} \quad (\text{IV.27.})$$

donde K es el número de reglas del sistema y donde los \tilde{y}^k son los consecuentes de las reglas para la salida y (en el sistema propuesto hay tres posibles salidas L_f^* , a_f^* y b_f^*). Estos consecuentes hay que estimarlos a partir del conjunto de muestras disponible para obtener el comportamiento deseado. Esto se realiza mediante la minimización de la función de suma del error cuadrático medio (ecuación (III.23.)), que lleva a la creación de un sistema de ecuaciones que se puede resolver mediante cualquier método matemático destinado a tal efecto. La *Descomposición de Valores Singulares (SVD)* se usó en este trabajo para solucionar los tres sistemas ecuaciones lineales construidos, uno para cada coordenada CIELAB post-blanqueamiento, obteniendo los coeficientes de los consecuentes óptimos para cada regla $\tilde{a}_f^{*\bullet}$, $\tilde{b}_f^{*\bullet}$ y $\tilde{L}_f^{*\bullet}$.

Ahora bien, dada la optimización expuesta, la función \tilde{y} de la ecuación (IV.27.) para un punto correspondiente al centro de una regla \bar{c}^k , será la suma, para todas aquellas reglas activadas por dicho punto de entrada, de:

$$\tilde{y}(\bar{c}^k) = \frac{\sum_{k/\mu^k(\bar{c}^k) > 0} \mu^k(\bar{c}^k) \tilde{y}^k}{\sum_{k/\mu^k(\bar{c}^k) > 0} \mu^k(\bar{c}^k)} \quad (\text{IV.28.})$$

Así, el consecuente óptimo \tilde{y}^k para la regla k no se corresponde inmediatamente con el valor esperado del sistema para la entrada \bar{c}^k , $\tilde{y}(\bar{c})$, sino que éste depende del resto de reglas cuyo valor de pertenencia para dicho punto no es nulo. Esto puede ocurrir en general en cualquier sistema difuso con particionamiento disperso, en el que las reglas (sus centros) están distribuidas en el espacio de entrada según se necesitan, y se utilizan funciones de pertenencia gaussianas que pueden ocasionar un cierto solapamiento entre las activaciones de las reglas, como es el caso del problema tratado en este estudio.

El asegurar, por tanto, que los consecuentes de las reglas sean consistentes con el área del espacio de entrada que cubren requiere de un cierto control. Esto puede realizarse en principio mediante *regularización* (Orr, 1995), aunque ésta no garantiza el significado local. Otros trabajos proponen *algoritmos genéticos multiobjetivo* (Johansen y Babuska, 2003) para la optimización simultánea del modelo de inferencia global y de los modelos locales. Sin embargo, para modelos con particionamiento del espacio *en rejilla*, hay soluciones que modifican la estructura del diseño del sistema difuso mediante la selección de funciones de pertenencia específicas (Bikdash, 1999; Herrera y cols., 2005). Estas funciones de pertenencia hacen que sólo la regla correspondiente se active para su propio centro, evitando el solapamiento en estos puntos, pero conservando las propiedades interpolativas y aproximativas del sistema. La solución tomada en este trabajo lleva este último punto de vista a sistemas dispersos mediante una modificación del cálculo de la activación final de las reglas. Recalcar aquí, que esta modificación no es posible en sistemas dispersos mediante el diseño de una función

de pertenencia específica, precisamente por la disposición irregular de las reglas en el espacio de entrada (Herrera y cols., 2009).

El enfoque propuesto se detalla a continuación con un ejemplo sencillo. Asumamos un espacio de entrada unidimensional dado con dominio $[0,1]$, con dos reglas con funciones de pertenencias gaussianas (MF) centrado por ejemplo en $c^1 = 0.2$ y $c^2 = 0.8$ con $\sigma = 0.3$ (ver figura IV.38.). En este caso, hay un solapamiento moderado entre las dos reglas activadas. Con objeto de cumplir con la condición de solapamiento antes mencionada, permitiremos que el dominio de activación de la primera regla $\mu^1(x)$ esté limitado por la función $1 - \mu^2(x)$. Esto es, cuando el valor de activación de la regla contraria sea 1, la activación de la primera regla será forzada a tomar el valor 0. El valor de activación final para cualquier punto normalizado en el sistema sería (ver figura IV.39.):

$$\mu^1(x) = \mu^1(x)(1 - \mu^2(x)) \frac{\mu^1(x)}{\sum_{k=1}^K \mu^{k'}(x)} = \frac{\mu^1(x)}{\mu^1(x) + \mu^2(x)} \tag{IV.29.}$$

$$\mu^2(x) = \mu^2(x)(1 - \mu^1(x)) \frac{\mu^2(x)}{\sum_{k=1}^K \mu^{k'}(x)} = \frac{\mu^2(x)}{\mu^1(x) + \mu^2(x)} \tag{IV.30.}$$

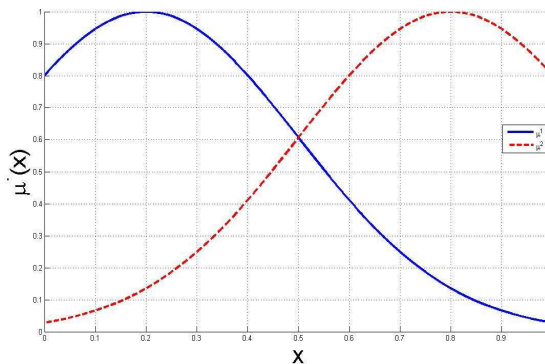


Figura IV.38. Funciones de pertenencia originales μ^1 y μ^2 para el ejemplo unidimensional.

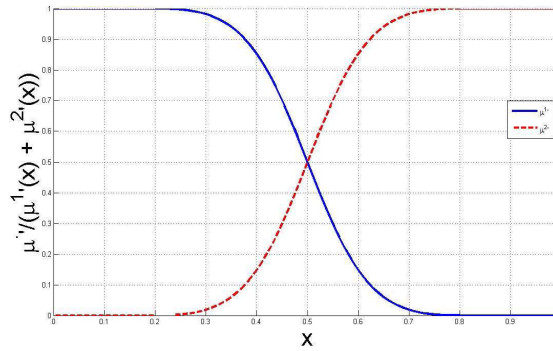


Figura IV.39. Funciones de pertenencia finales normalizadas utilizando el cálculo modificado $\mu^1(x)/\mu^1(x) + \mu^2(x)$ y $\mu^2(x)/\mu^1(x) + \mu^2(x)$.

Generalizando al caso n -dimensional, el valor de activación de la regla k -th se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\mu^{k'}(\bar{x}) = \mu^k(\bar{x}) \prod_{\substack{j=1; \\ j \neq k}}^K (1 - \mu^j(\bar{x})) \tag{IV.31.}$$

Por tanto, para un número dado de reglas K , la expresión general normalizada para el sistema difuso TSK de salida, puede calcularse como:

$$\tilde{f}(\bar{x}) = \frac{\sum_{k=1}^K \mu^{k'}(\bar{x}) \tilde{y}^k}{\sum_{k=1}^K \mu^{k'}(\bar{x})} = \frac{\sum_{k=1}^K \left(\mu^k(\bar{x}) \prod_{\substack{j=1; \\ j \neq k}}^K (1 - \mu^j(\bar{x})) \right) \tilde{y}^k}{\sum_{k=1}^K \left(\mu^k(\bar{x}) \prod_{\substack{j=1; \\ j \neq k}}^K (1 - \mu^j(\bar{x})) \right)}. \tag{IV.32.}$$

Esta nueva formulación de la salida del sistema dado en la ecuación (IV.32.) cumple con las condiciones para el modelado simultáneo global y local deseado. No obstante, la función de salida del modelo propuesto es continua y derivable, puesto que se trata de una composición lineal de funciones continuas y derivable. Es, por

tanto, inmediato deducir que las siguientes propiedades se cumplen, debido a la continuidad de la función gaussiana:

$$\begin{aligned} \mu^{2*}(c^1) = 0; \mu^{1*}(c^1) = 1; &\Rightarrow \tilde{f}(c^1) = y^1(c^1) = a^1 \\ \mu^{1*}(c^2) = 0; \mu^{2*}(c^2) = 1; &\Rightarrow \tilde{f}(c^2) = y^2(c^2) = a^2 \end{aligned} \quad \text{(IV.33.)}$$

De esta manera, de acuerdo a esta ecuación, se mantiene que los consecuentes \tilde{y}^k de las reglas son exactamente los valores del sistema difuso de salida en los puntos en torno al centro de la regla respectiva. Esos resultados pueden directamente extrapolarse al caso n -dimensional, gracias a la continuidad de las funciones compuestas.

IV.4.1.3. Construcción de un sistema difuso basado en la guía Vitapan Classical®

Para simplificar los resultados obtenidos, a continuación se muestra el sistema difuso que se construyó exclusivamente para el grupo de pacientes normales (ecuación (IV.34.)). Inicialmente, del conjunto de muestras en el grupo de pacientes normales, con 37 voluntarios, se utilizaron las medidas colorimétricas de los dientes de 30 de ellos seleccionados aleatoriamente para construir y optimizar el sistema de reglas, y las medidas de los 7 restantes como conjunto de test para evaluar la aproximación obtenida con el modelo. Las medidas en L^* , a^* y b^* fueron normalizadas para otorgar el mismo peso a las tres coordenadas (las coordenadas cromáticas a^* y b^* presentan un rango de valores menor que la coordenada L^* , y ésta a su vez presenta mayor dispersión).

Los tonos de la guía Vitapan Classical® utilizados en las reglas difusas fueron aquellos que presentaban una cobertura de datos suficiente. Para los tonos B1, A1, D2 y C1, no se encontraron muestras colorimétricas de dientes asociables directamente a estos tonos por valores de sus funciones de pertenencia.

Las reglas obtenidas para los 12 tonos restantes son las siguientes:

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{B2}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{B2}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{B2}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 68.89 \text{ Y } a_f^* = 4.68 \text{ Y } b_f^* = 9.49$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{A2}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{A2}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{A2}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 60.39 \text{ Y } a_f^* = 4.49 \text{ Y } b_f^* = 8.15$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{C2}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{C2}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{C2}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 53.29 \text{ Y } a_f^* = 7.12 \text{ Y } b_f^* = 11.86$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{D4}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{D4}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{D4}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 57.87 \text{ Y } a_f^* = 4.08 \text{ Y } b_f^* = 10.90$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{D3}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{D3}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{D3}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 62.82 \text{ Y } a_f^* = 2.80 \text{ Y } b_f^* = 3.51$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{A3}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{A3}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{A3}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 64.24 \text{ Y } a_f^* = 6.14 \text{ Y } b_f^* = 11.74$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{B3}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{B3}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{B3}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 49.29 \text{ Y } a_f^* = 6.89 \text{ Y } b_f^* = 13.45$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{A3.5}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{A3.5}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{A3.5}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 55.65 \text{ Y } a_f^* = 6.84 \text{ Y } b_f^* = 11.72$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{B4}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{B4}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{B4}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 54.05 \text{ Y } a_f^* = 7.08 \text{ Y } b_f^* = 14.50$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{C3}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{C3}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{C3}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 53.46 \text{ Y } a_f^* = 5.16 \text{ Y } b_f^* = 10.72$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{A4}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{A4}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{A4}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 45.38 \text{ Y } a_f^* = 6.90 \text{ Y } b_f^* = 12.50$$

$$\text{SI } L_i^* \text{ es } \hat{C4}_{L^*} \text{ Y } a_i^* \text{ es } \hat{C4}_{a^*} \text{ Y } b_i^* \text{ es } \hat{C4}_{b^*}$$

$$\text{ENTONCES } L_f^* = 47.32 \text{ Y } a_f^* = 5.66 \text{ Y } b_f^* = 11.78$$

(IV.34.)

Los errores estándar de entrenamiento para el sistema construido fueron de 7.24, 1.39 y 2.30 para las coordenadas L^*_i , a^*_i y b^*_i , respectivamente, y los errores de test fueron respectivamente 7.29, 1.39 y 2.33. En el caso de utilizar un sistema difuso tradicional que no controle el modelado local, los errores de entrenamiento y de test serían similares que en el modelo propuesto (error estándar de entrenamiento igual a 7.44, 1.41, y 2.28 para L^* , a^* y b^* , respectivamente, y error estándar de test igual 7.32, 1.42, y 2.40, respectivamente) pero con el inconveniente de que los consecuentes no reflejan los valores directos esperados en CIELAB para los tonos VITA .

Por otra parte, como comparación con los modelos lineales multivariantes calculados en el apartado **IV.3.1.1.** para pacientes normales, también se calcularon modelos lineales multivariantes para estimar los valores post-blanqueamiento de L^*_i , a^*_i y b^*_i , a partir de sus valores pre-blanqueamiento L^*_i , a^*_i y b^*_i , tomando los datos colorimétricos pertenecientes a 30 pacientes para construir los modelos y las medidas de los 7 restantes para evaluarlos. En este caso, los errores estándar de entrenamiento fueron 6.86, 1.34, y 2.19, respectivamente, y los de test 7.01, 1.34, y 2.38, respectivamente, que como se observa son similares a los obtenidos con el modelo difuso propuesto.

Uniendo el conjunto de entrenamiento y de test para entrenar al sistema de reglas, los errores estándar obtenidos en la aproximación fueron de 6.93, 1.37 y 2.25 para L^* , a^* y b^* , respectivamente, de nuevo similares a los obtenidos para los modelos lineales: 6.72, 1.41 y 2.15, respectivamente, para pacientes normales.

Los consecuentes óptimos de las reglas, usando el conjunto completo para entrenar al modelo, se muestran en la siguiente tabla:

Tono VITA	L_r^*	a_r^*	b_r^*
B2	68.48	4.70	9.59
A2	61.45	4.93	8.81
C2	55.54	6.69	11.89
D4	58.79	4.01	11.64
A3	56.76	3.72	5.09
D3	66.79	6.07	11.41
B3	46.99	6.73	13.71
A3,5	53.04	7.18	11.72
B4	53.50	7.12	14.59
C3	53.56	5.19	10.43
A4	47.04	6.01	11.34
C4	43.84	5.72	11.44

Tabla IV.25. Consecuentes óptimos de las reglas considerando el conjunto completo de datos.

Conforme a nuestros resultados, estos consecuentes óptimos reflejan los valores directos esperados en CIELAB para dientes con coordenadas cromáticas pre-blanqueamiento iguales a las de los tonos VITA de la guía Vitapan Classical[®], según el conjunto de datos completo considerado.

Discusión

V.1. Evaluación colorimétrica en el proceso de blanqueamiento dental

Actualmente, las diferentes técnicas de blanqueamiento dental constituyen una de las alternativas más conservadoras para el tratamiento de las discoloraciones dentales. Para la evaluación de los resultados obtenidos con este tipo de tratamientos, el odontólogo cuenta con las *guías de color*, habitualmente empleadas para este fin (Van der Burgt y cols., 1990; Paul y cols., 2002; Zantner y cols., 2006). Numerosos estudios han descrito las desventajas en la comparación visual con estas guías, tanto *in vivo* como *in vitro*, para la medición del color dental dada la subjetividad del proceso (Sproull, 1974; Preston, 1985; Douglas, 1997; Tung y cols., 2002; Joiner, 2004; Joiner y cols., 2008b). Así se ha descrito que, por ejemplo, el rango de tonos disponibles en estas guías de color no cubre completamente el rango de color de los dientes naturales ni de los que han recibido un tratamiento blanqueador (Ishikawa-Nagai y cols., 2004a; Zantner y cols., 2006).

La selección subjetiva del color mediante guías va a depender, entre otros factores, de las características fisiológicas y psicológicas del observador, responsables de captar la energía estimulada (Segura y cols., 1999; Paravina, 2003; Devigus, 2004; Martínez y cols., 2004; Hassel y cols., 2006; Lu y cols., 2006; Pascual y cols., 2006). Pocas veces distintos observadores van a coincidir en la selección del color, por lo que se recomienda el empleo de métodos objetivos para realizar una medición más precisa y reproducible del color dental (Amengual y cols., 2005). Por lo anterior y dado los objetivos del presente trabajo, la medición del cambio cromático producido tras el blanqueamiento dental se realizó instrumentalmente.

Entre los dispositivos disponibles en la clínica dental, para realizar una medición objetiva del color, se encuentran los *colorímetros de contacto* y los *espectrofotómetros dentales*, que ofrecen la posibilidad de cuantificar y captar el color de forma más precisa (Joiner, 2004; Hassel y cols., 2006).

A pesar de las ventajas mencionadas de estos dispositivos, en nuestro estudio hemos empleado, como instrumento de medida objetiva, un *espectrorradiómetro* (SpectraScan PR-704[®] de Photo Research). Por un lado, las condiciones de medida de este dispositivo son similares en las que se realiza la observación por el ojo humano, y por otro, el espectrorradiómetro no requiere contacto directo con la superficie del diente a medir, evitando de este modo la reflexión no uniforme de la luz hacia el detector del aparato. Además, aunque, en principio, un espectrofotómetro con una fuente de luz de xenón pulsada (adecuadamente filtrada para la simulación del iluminante D65) simula la radiación ultravioleta de un fluorescente estándar, podría haber pequeñas diferencias, en cuanto a esta radiación, entre la empleada en la evaluación visual y la del diente objeto a medir (Luo y cols., 2005). La superficie no plana y la translucidez natural del diente, junto a las deficiencias anteriormente citadas, contribuyeron a la decisión del uso de un espectrorradiómetro para la realización de las medidas del presente estudio.

Por tanto, podemos señalar que para la realización de este trabajo hemos puesto a punto un nuevo método experimental que, minimiza en gran medida, las

deficiencias observadas en métodos previos para la medición del color dental *in vivo*.

No obstante, el uso en clínica de este dispositivo de medida está limitado por sus grandes dimensiones y, además, requiere conocimientos en Colorimetría por parte del profesional, ya que el espectrorradiómetro obtiene los valores triestímulo, a partir de los cuales se calculan las coordenadas cromáticas en el espacio de representación de color que más se emplea en Odontología, el espacio *CIE1976* o *CIELAB*.

Como complemento del dispositivo de medida y, para que las medidas se tomaran con la mayor precisión y exactitud, también se utilizó una *mentonera*, de manera que el paciente tuviese la cabeza inmovilizada durante la medición del color (Hasegawa y cols., 2000b), además de una férula posicionadora de acrílico, de forma que los diferentes registros de color con el espectrorradiómetro se realizaran siempre en el mismo punto o zona del diente (Douglas, 1997; Shimada y cols., 2004).

A lo largo de los últimos años, han sido numerosos los ensayos que han estudiado el cambio cromático producido en los dientes tras la aplicación de un agente blanqueador. La mayoría de estos trabajos suelen tener como objetivo, fundamentalmente, el comprobar la eficacia de un protocolo de blanqueamiento determinado evaluando el cambio cromático dental experimentado por el paciente mediante la comparación con tablillas de una guía de color dada. Pocos trabajos evalúan instrumentalmente la variación *in vivo* de las coordenadas cromáticas dentales en *CIELAB* (L^* , a^* y b^*) tras la aplicación de un blanqueamiento determinado (Gerlach y cols., 2000; Gerlach y cols., 2002; Ishikawa-Nagai y cols., 2004b; Goodson y cols., 2005; Zantner y cols., 2006; Joiner y cols., 2008a; Joiner y cols., 2008b). Así, los trabajos de Gerlach y cols. (Gerlach y cols., 2002) e Ishikawa-Nagai y cols. (Ishikawa-Nagai y cols., 2004b), valoraron la respuesta objetiva a dos tipos diferentes de blanqueamiento dental después de dos semanas, encontrando que la mejora esperada con este tipo de tratamiento estuvo significativamente correlacionada con los cambios en b^* y, en menor medida, con los cambios en L^* y

en a^* . Un estudio realizado posteriormente por Goodson y cols. (Goodson y cols., 2005) confirmó que el blanqueamiento dental produce una reducción más considerable en el valor de b^* que un aumento en el valor de la luminosidad L^* . Otros estudios como el de Zantner y cols. (Zantner y cols., 2006), sí destacan el aumento de L^* y la reducción en las coordenadas a^* y b^* tras el blanqueamiento dental. Dichos trabajos presentan controversia en cuanto a sus resultados. Esto es, el grado de cambio de color tras la aplicación de un blanqueamiento dental determinado varía entre diferentes estudios. Estas variaciones podrían deberse, entre otros factores, al establecimiento de diferentes protocolos de tratamientos, a las diferentes pautas de aplicación del agente blanqueador, al empleo de diferentes dispositivos para la medición instrumental del color dental, etc.

En nuestros resultados encontramos que, tras dos semanas de aplicación de Opalescente PF[®] al 20% durante dos horas al día, se produce una notable reducción en el valor medio de la coordenada b^* ($\Delta b^* = -3.5$ para pacientes normales y $\Delta b^* = -2.6$ para pacientes tetraciclínicos) y de la coordenada a^* ($\Delta a^* = -1.8$ para ambos grupos de pacientes) y un aumento en el valor medio de la luminosidad L^* ($\Delta L^* = 2.9$ para pacientes normales y $\Delta L^* = 1.3$ para pacientes tetraciclínicos). En general, las tendencias de nuestros resultados concuerdan con las obtenidas en algunos de los trabajos previos para estas mismas coordenadas cromáticas, encontrando una mayor variación media en b^* y, por tanto, en el croma C^* , que en a^* y L^* .

Conforme a nuestros resultados, el blanqueamiento dental consigue que el diente sea, con independencia de si se trata de un diente sano o con tinción por tetraciclinas, menos amarillo, menos rojo y más luminoso (una a^* positiva indica que el diente se vuelve más rojo, mientras que una a^* negativa equivale a un diente menos rojo. Una b^* positiva indica que el diente se vuelve más amarillo y una b^* negativa, muestra un diente menos amarillo). La justificación a este cambio, si bien nadie la ha probado experimentalmente, podría residir en el proceso de acción del agente blanqueador. En concreto, la oxidación y, por tanto, la degradación de moléculas cromógenas (Baratieri, 1994), ópticamente activas, podría ser la causa del cambio cromático observado, ya que el proceso de blanqueamiento no produce cambios estructurales en el tejido (Dahl y Pallesen, 2003). Se trata, por tanto, de un tratamiento “químico” del diente.

Con respecto a los resultados obtenidos para los dos grupos de estudio, debemos aclarar que queda pendiente realizar un análisis más detallado comparando dichos resultados entre los pacientes normales y los pacientes tetraciclínicos. No obstante, ambos grupos muestran una tendencia hacia el blanco modelo $(100,0,0)$, como se observa en las figuras **IV.10.** y **IV.22.**. Esta tendencia es más pronunciada en el plano cromático (a^*,b^*) , acercándose al estímulo acromático $(0,0)$. Asimismo, la coordenada L^* presenta una mayor dispersión y un menor pronunciamiento aunque igualmente con tendencia de acercamiento al valor de 100 correspondiente al de mayor luminosidad (figuras **IV.11.** y **IV.23.**).

La *blancura* es un importante atributo, y a lo largo de la historia, en campos ajenos a la Odontología, se ha buscado un índice de color unidimensional para cuantificarla. Para ello, se han ido desarrollando una serie de fórmulas de blanqueamiento cuyo resultado es un único valor numérico, también llamado *índice de blanqueamiento*. Entre ellos los más usados son el índice CIE *WIC* y los índices del ASTM E-313-73 y Z%. Dichos índices se calculan a partir de los valores triestímulo X, Y, Z y de las coordenadas cromáticas x, y, Y del espacio CIE1931. En este contexto, recientemente Luo y cols. (Luo y cols., 2009) han propuesto un nuevo índice de blanqueamiento, el índice *WIO*, el cual se desarrolla mediante una optimización de los coeficientes de la fórmula de *WIC* a partir de datos y observaciones colorimétricas de dientes de porcelana. Teniendo en cuenta que, el sistema de representación de color CIE1976 o CIELAB, y sus diferencias de color asociadas, constituyen el espacio cromático más empleado en el campo de la Odontología, el empleo y la interpretación de los índices anteriormente mencionados se hace poco útil en aplicaciones clínicas e incluso en investigaciones en este campo.

Por este motivo, en el presente trabajo se ha desarrollado un nuevo y sencillo índice basado en el sistema de representación cromática CIELAB para la medida del blanqueamiento de una superficie y que se define como la distancia euclídea en este espacio entre el color dentario y el blanco modelo $(100,0,0)$, al que llamamos índice de blanqueamiento EW^* . Éste puede ser muy útil ya que el espacio CIELAB presenta mayor uniformidad que CIE1931 y, por tanto, similares distancias se

corresponden con similares diferencias en la sensación cromática. Aunque algunos trabajos, como el de Kuehni (Kuehni, 1998) han mostrado deficiencias en la uniformidad de CIELAB, este espacio es, como hemos comentado anteriormente, el más empleado en Odontología y, por tanto, el más útil a nuestros propósitos.

Conforme a nuestros resultados, tras el proceso de blanqueamiento existe una disminución en el índice de blanqueamiento EW^* con un valor medio de $\Delta EW^* = -4.1$ para el grupo de pacientes normales y $\Delta EW^* = -2.2$ para los tetraciclínicos. Es decir, para ambos grupos, se produce una disminución de la distancia euclídea al blanco modelo $(100,0,0)$, como cabría esperar dados los resultados obtenidos para las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* . Aunque la tendencia de este parámetro es la misma para los dos grupos de estudio, sí es cierto que en el caso de los pacientes con tinción por tetraciclinas, la variación media en EW^* es menor en valor absoluto, lo que podría deberse a una menor respuesta al blanqueamiento para este grupo de pacientes.

Para valorar la utilización y adecuación del índice de blanqueamiento EW^* en nuestro estudio, se realizó una estimación de las magnitudes del índice EW^* y del croma C^* de la guía Vita Bleachedguide 3D Master[®] de la casa Vita¹. Según el fabricante, esta nueva guía, basada en los tres atributos del color (*tono, croma y luminosidad*), está diseñada específicamente para evaluar el resultado obtenido con el blanqueamiento dental, incluyendo valores intermedios (de luminosidad y croma) disponibles en forma de muestras de colores (tablillas).

La tabla **V.1.** muestra los valores del índice de blanqueamiento EW^* y el croma C^* para las muestras incluidas en dicha guía, junto con las diferencias estimadas respecto de los valores previos. Igualmente, la figura **V.1.** muestra la evolución de dichas magnitudes. El valor medio de las variaciones de un tono a la siguiente tablilla (de menor croma) es de -1.88 para el índice EW^* (variando entre -0.69 y -3.04, varianza = 0,41) y de -1.71 (variando entre -0.45 y -3.09, varianza = 0,89) para C^* .

¹ La guía Vita Bleachedguide 3D Master[®] salió al mercado con posterioridad al establecimiento del protocolo diseñado en este estudio, por lo que se empleó la guía Vitapan Classical[®] para la medición subjetiva del color dental.

Muestra	EW^*	Variación EW^* respecto de la muestra anterior	C^*	Variación C^* respecto de la muestra anterior
0M1	25,22	-2,20	4,93	-2,24
0.5M1	27,42	-1,71	7,17	-2,48
1M1	29,13	-1,38	9,65	-3,09
1M1.5	30,51	-0,94	12,74	-2,40
1M2	31,44	-1,65	15,14	-0,51
1.5M2	33,09	-1,74	15,65	-0,57
2M2	34,83	-2,10	16,22	-0,98
2.5M2	36,93	-1,78	17,20	-0,45
3M2	38,72	-2,56	17,65	-1,63
3.5M2	41,28	-1,65	19,28	-0,71
4M2	42,93	-2,39	19,99	-1,99
4.5M2	45,32	-2,52	21,98	-1,38
5M2	47,84	-0,69	23,36	-2,91
5M2.5	48,53	-3,04	26,27	-2,63
5M3	51,57	-	28,90	-
Valor medio	-	-1,88	-	-1,71

Tabla V.1. Valores de las magnitudes EW^* y C^* para cada tablilla de la guía Vita Bleachedguide 3D Master®.

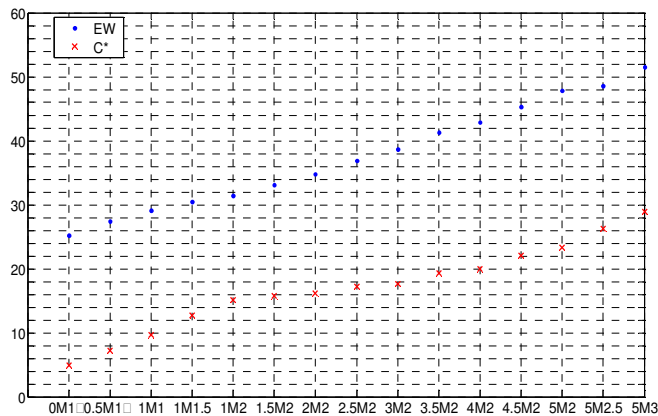


Figura V.1. Evolución de las magnitudes EW^* y C^* para cada tablilla de la guía Vita Bleachedguide 3D Master®.

Como se observa, los valores en el índice de blanqueamiento propuesto (EW^*) presentan las mismas tendencias que los valores en el cromático obtenidas de las tablillas de la guía Vita Bleachedguide 3D Master®.

El *umbral de perceptibilidad* constituye el límite perceptivo inferior y permite estimar cuál es el número máximo de colores que puede discernir el sistema visual humano en una determinada región del espacio cromático. No obstante, y especialmente en el ámbito industrial, se trabaja también con diferencias de color de tamaño superior al umbral de perceptibilidad, definidas como *umbrales de aceptabilidad* o *tolerancias de color*.

Son numerosos los estudios que han evaluado los límites de las diferencias de color perceptibles/aceptables en la práctica dental. El estudio de Kuehni y Marcus (Kuehni y Marcus, 1979) es una de las principales referencias para establecer los umbrales de aceptabilidad y perceptibilidad para pequeñas diferencias de color. Los autores encontraron que la diferencia de color media para el 50% de los observadores fue de una unidad CIELAB ($\Delta E^*_{ab}=1$). Posteriormente, Seghi y cols. (Seghi y cols., 1989), evaluaron umbrales de perceptibilidad para un grupo de profesionales en Odontología; sus resultados mostraron que las diferencias de color mayores a 2 unidades CIELAB ($\Delta E^*_{ab}\geq 2$) eran detectadas por el 100% de los observadores. Más tarde, Ragain y Johnston (Ragain y Johnston, 2000) evaluaron umbrales de aceptabilidad en discos de porcelanas translúcidas y encontraron un valor medio de $\Delta E^*_{ab}=2.72$. Ruyter y cols. (Ruyter y cols., 1987), calcularon umbrales de aceptabilidad y establecieron que, para pares de resinas, las diferencias de color eran inaceptables cuando su umbral de aceptabilidad era de aproximadamente $\Delta E^*_{ab}=3.3$ unidades.

Douglas y Brewer (Douglas y Brewer, 1998) determinaron umbrales de perceptibilidad y aceptabilidad cromática, pero considerando independientes las direcciones en a^* y b^* en CIELAB. Los resultados mostraron que las diferencias de color en aceptabilidad para el eje a^* era de 1.1 unidades CIELAB y en el eje b^* de 2.1 unidades CIELAB. Además, señalaron que, mientras los umbrales de aceptabilidad (50% aceptabilidad) fueron de 2.1 unidades CIELAB, los de perceptibilidad eran sólo de 0.7 unidades CIELAB. También en este sentido, otros trabajos (Sim y cols., 2001) estimaron los umbrales de discriminación cromática en los ejes L^* , a^* y b^* . Las diferencias de color perceptibles encontradas fueron 4.5, 0.69 y 2.4, respectivamente.

Recientemente, Lindsey y Wee (Lindsey y Wee, 2007) han evaluado umbrales de discriminación cromática, aceptabilidad y perceptibilidad, empleando simulaciones generadas mediante ordenador. Los resultados obtenidos muestran, en las direcciones de L^* , a^* y b^* , un umbral medio de aceptabilidad de $\Delta E^*_{ab}=1$ para las direcciones L^* y a^* y de $\Delta E^*_{ab}=2.6$ en la dirección del eje correspondiente al eje b^* . No se encontraron diferencias entre umbrales de aceptabilidad y perceptibilidad. De acuerdo a estos resultados, el umbral no es uniforme en todas las direcciones y los cambios en b^* han de ser mayores para que pueda ser detectado por el observador.

Como se puede deducir de los párrafos anteriores son muchos los trabajos que estudian y establecen umbrales para dientes o prótesis dentales. Sin embargo, dada la diversidad de los métodos empleados en su cálculo, número de observadores y materiales, etc, es difícil establecer un único umbral de perceptibilidad o de aceptabilidad. No obstante, los resultados de dichos trabajos permiten, de forma adecuada, evaluar las diferencias de color que pueden sufrir tanto los dientes como las prótesis en diferentes procesos: fotoactivación, pulido, etc. Y serán empleados para evaluar si las diferencias de color encontradas tras el blanqueamiento dental son del orden del umbral de perceptibilidad o aceptabilidad.

A continuación, las tablas **V.2.** y **V.3.** muestran, para cada uno de los dientes estudiados, la variación media de las coordenadas cromáticas durante el proceso de blanqueamiento. Igualmente, las dos últimas columnas muestran los valores de la diferencia de color media (CIELAB y CIEDE2000) para cada conjunto de dientes.

El signo negativo de las variaciones en las coordenadas cromáticas a^* y b^* y, por tanto, para el croma C^* , indica la disminución en el valor de dichas coordenadas, mostrando claramente la tendencia hacia dientes más acromáticos y más desaturados. Análogamente, el signo positivo en el incremento de la coordenada L^* muestra la tendencia contraria, esto es, un aumento de la luminosidad. En cambio, para el ángulo de tono, h^o , no encontramos una tendencia clara, dependiendo del signo de la variación en el tono del diente analizado. No obstante, cabe señalar que la variación en el mismo es inferior a la encontrada para el croma y la luminosidad.

Diente	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{00}
11	-1,54 (1,44)	-3,45 (2,57)	1,36 (6,03)	-3,77 (2,86)	-0,69 (3,19)	6,79 (3,77)	5,21 (3,18)
12	-1,45 (1,71)	-3,05 (2,65)	1,85 (8,19)	-3,37 (2,98)	-1,21 (5,02)	8,34 (4,56)	6,79 (4,35)
13	-2,49 (1,63)	-4,16 (2,17)	2,71 (8,09)	-4,85 (2,51)	0,47 (3,54)	8,99 (4,62)	7,13 (4,49)
21	-1,79 (2,69)	-2,97 (2,41)	2,81 (5,78)	-3,56 (3,15)	1,09 (7,36)	7,24 (3,62)	5,47 (3,01)
22	-1,61 (1,60)	-3,22 (2,72)	3,93 (7,01)	-3,59 (3,02)	0,07 (4,42)	8,17 (4,44)	6,70 (4,19)
23	-2,13 (1,94)	-3,67 (2,37)	5,85 (7,67)	-4,24 (2,86)	1,03 (4,61)	9,25 (5,83)	7,69 (5,72)

Tabla V.2. Valores promedios y desviación estándar de las diferencias de las coordenadas cromáticas y diferencias de color CIELAB y CIEDE2000 para el grupo de pacientes normales.

Diente	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{00}
11	-1,63 (1,15)	-2,39 (1,77)	1,97 (5,55)	-2,90 (1,91)	0,69 (5,02)	6,03 (3,10)	4,94 (2,83)
12	-1,49 (1,35)	-2,21 (1,86)	0,03 (6,07)	-2,66 (2,18)	0,51 (3,96)	5,85 (3,64)	4,74 (3,49)
13	-2,35 (1,52)	-3,22 (2,45)	3,93 (5,88)	-3,99 (2,74)	-0,06 (3,87)	7,05 (4,83)	5,71 (4,22)
21	-1,01 (1,73)	-2,30 (3,55)	0,77 (4,25)	-2,35 (3,48)	-3,76 (14,63)	5,51 (2,95)	4,27 (2,47)
22	-1,47 (1,56)	-2,22 (2,16)	0,59 (4,58)	-2,66 (2,52)	0,48 (4,81)	5,25 (2,56)	4,17 (2,21)
23	-2,61 (1,41)	-3,46 (2,01)	1,95 (7,63)	-4,34 (2,33)	0,35 (3,45)	7,57 (5,21)	6,04 (4,69)

Tabla V.3. Valores promedios y desviación estándar de las diferencias de las coordenadas cromáticas y diferencias de color CIELAB y CIEDE2000 para el grupo de pacientes tetraciclínicos.

Las diferencias de color CIELAB (ΔE^*_{ab}) y CIEDE2000 (ΔE^*_{00}) obtenidas en ambos grupos son del mismo orden de magnitud, aunque ligeramente inferiores para los pacientes tetraciclínicos. Como podemos observar en ambas tablas, existe una ligera diferencia entre los resultados obtenidos utilizando la formulación CIELAB y CIEDE2000, siendo los valores más bajos para esta última fórmula. Esto se debe a la diferente escala de la coordenada a' para CIEDE2000 (Pérez y cols., 2007).

Basándonos en los resultados obtenidos, podemos observar que nuestras diferencias de color para el grupo de pacientes normales (tabla V.2.) son claramente perceptibles e incluso mayores que los umbrales de aceptabilidad en los dientes objeto de estudio de acuerdo a los trabajos anteriormente citados; si bien, podemos considerar que el concepto de umbral de aceptabilidad, en blanqueamiento dental, es discutible ya que en este caso no hay un límite de

aceptabilidad. No obstante, dicho umbral nos parece un buen criterio de partida en nuestro estudio para evaluar si las diferencias de color obtenidas tras el tratamiento son claramente perceptibles. Además, de acuerdo con el trabajo de Lindsey y Wee (Lindsey y Wee, 2007), nuestros umbrales no son uniformes en todas las direcciones dado que el valor de las diferencias para cada coordenada difiere. Por otra parte, nuestros resultados muestran que estas diferencias direccionales están por encima del umbral de perceptibilidad y de aceptabilidad, dado que el valor medio para cada dirección es superior al señalado por Lindsey y Wee (umbral medio de aceptabilidad de $\Delta E^*_{ab}=1$ para las direcciones L^* y a^* y de $\Delta E^*_{ab}=2.6$ en la dirección del eje correspondiente al eje b^*).

Teniendo en cuenta que los dientes 1.3 y 2.3 son inicialmente más cromáticos y que, para estos mismos dientes, se obtuvieron mayores diferencias en a^* y en b^* ($\Delta a^*=-2,49$ y $\Delta b^*=-4,16$ para 1.3, y $\Delta a^*=-2,13$ y $\Delta b^*=-3,67$ para 2.3), podemos afirmar que los caninos superiores experimentaron una mayor desaturación, tras el tratamiento blanqueador, que el grupo de los incisivos superiores (1.2 a 2.2). Para todos los dientes, encontramos que las diferencias en L^* también están por encima del umbral de perceptibilidad y de aceptabilidad, pero con una desviación estándar muy alta en todos ellos, confirmando la dispersión de los datos para esta coordenada.

En el caso de los pacientes tetraciclínicos, en la tabla **V.3**. se observa que los cambios en la coordenada a^* sí son perceptibles pero los cambios en la coordenada b^* no lo son, salvo para los caninos superiores (1.3 y 2.3). Asimismo, para este mismo grupo de voluntarios, encontramos que los cambios en la coordenada L^* tampoco son perceptibles, excepto para los dientes 1.1, 1.3 y 2.3. La alta desviación estándar que se obtiene para L^* , también confirma la dispersión de los datos disponibles para esta misma coordenada en los tetraciclínicos. Al igual que en el grupo anterior, los dientes 1.3 y 2.3 de los pacientes tetraciclínicos, también experimentan una mayor variación cromática tras el tratamiento blanqueador ($\Delta a^*=-2,35$ y $\Delta b^*=-3,22$ para 1.3, y $\Delta a^*=-2,61$ y $\Delta b^*=-3,46$ para 2.3).

Con respecto al análisis de la varianza ANOVA, debemos señalar que, desde un punto de vista clínico, no siempre la *significación estadística* resuelve todos los interrogantes planteados con respecto a cualquier fenómeno biológico. Esto es, la asociación *estadísticamente significativa* puede no ser clínicamente relevante o no ser causal (Silva, 1997). En nuestro estudio, hemos encontrado significación estadística en algunas de las variables exógenas estudiadas (figura III.6.), pero dado que entre los objetivos de esta Tesis no está el análisis de la influencia de dichas variables sobre la eficacia del tratamiento blanqueador empleado, sino valorar si dichas variables influyen en los modelos predictivos, el estudio de esta influencia será motivo de un trabajo posterior.

V.2. Predicción del cambio cromático tras el blanqueamiento dental usando modelos lineales basados en CIELAB

El establecimiento de directrices que permitan predecir los cambios del color del diente después del proceso de blanqueamiento es uno de los retos a los que se enfrenta actualmente el campo de la Estética Dental. Es bien conocido, como se ha señalado anteriormente, que el sistema de representación de color CIE1976 o CIELAB y sus fórmulas de diferencia de color asociadas, constituyen el espacio cromático más empleado en la práctica industrial y, en concreto, en Odontología. En la presente Memoria se han definido *modelos lineales univariantes y multivariantes*, basados en las coordenadas cromáticas pre-blanqueamiento en CIELAB, en los atributos cromáticos *croma* C^* y *ángulo de tono* h^o , y en el índice de blanqueamiento EW^* . Estos modelos nos permiten predecir las características cromáticas del diente tras dicho tratamiento.

Comenzaremos nuestro análisis abordando los modelos obtenidos, en el grupo de pacientes normales, para L^* , a^* y b^* a partir de sus valores iniciales ($a^*_f = 3.00 - 0.019 \times L^*_i + 0.23 \times a^*_i + 0.14 \times b^*_i$, $b^*_f = 5.92 - 0.047 \times L^*_i - 0.20 \times a^*_i + 0.64 \times b^*_i$ y $L^*_f = 20.36 + 0.73 \times L^*_i - 0.046 \times a^*_i - 0.14 \times b^*_i$) (ecuaciones **IV.1.**, **IV.2.** y **IV.3.**, respectivamente). Trabajos anteriores como el de Ishikawa-Nagai y cols. (Ishikawa-Nagai y cols., 2004a) aportan el módulo o diferencia de color sin especificar la dirección en la que se produce el cambio cromático tras el proceso de blanqueamiento dental. Esto es, los modelos obtenidos en estos trabajos no especifican cuál es el color final que se obtiene con este tipo de tratamientos. En este sentido, nuestro trabajo aporta una nueva vía de conocimiento, aproximando el valor esperado tras el cambio cromático, además de conocer la influencia de los valores iniciales de las coordenadas cromáticas sobre los valores finales de las mismas.

Los coeficientes de determinación para las ecuaciones **IV.1.**, **IV.2.** y **IV.3.** fueron 0.23 , 0.35 y 0.53 , respectivamente. Los coeficientes de correlación parciales entre los valores iniciales y finales de las coordenadas cromáticas se mostraron en la tabla **IV.20**. Para a^*_f y b^*_f los coeficientes de correlación son bajos, especialmente con la variable L^*_i ($r < 0.17$). Esto implica que el valor de las coordenadas cromáticas tras el proceso de blanqueamiento puede venir influenciado por el valor de las coordenadas cromáticas pre-blanqueamiento, pero no por el valor de su luminosidad inicial. Este resultado es especialmente significativo para la coordenada b^* . Sin embargo, existe una importante influencia del valor inicial de L^* sobre su valor final sin que su valor dependa de las coordenadas cromáticas a^* y b^* . Además, la correlación fuerte y positiva encontrada entre L^*_f y L^*_i indica que la mayor variación en L^* la presentan los dientes de menor luminosidad, es decir, los más oscuros (grisáceos), tal y como podemos deducir de la expresión $\Delta L^* = 20.36 - 0.27 \times L^*_i$, obtenida si despreciamos los valores de a^*_i y b^*_i . Si observamos el modelo univariable obtenido para la variación en L^* ($\Delta L^* = 17.9 - 0.27 \times L^*_i$) (ecuación **IV.12.**) podemos ver que, aún siendo diferente el valor del término independiente, se confirma que las variaciones en L^* vienen explicadas por su valor inicial.

Estas tendencias también fueron observadas para incisivos y caninos separadamente, como muestran las tablas **V.4.** y **V.5.**, aunque con valores de

coeficiente de correlación más elevados debido, probablemente, al menor número de datos en cada conjunto.

r	L^*_f	a^*_f	b^*_f	EW^*_f
L^*_i	1.00	-0.04	-0.06	-0.33
a^*_i	-0.04	1.00	0.39	0.34
b^*_i	-0.06	0.39	1.00	0.04

Tabla V.4. Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* , para los incisivos en el grupo de pacientes normales.

r	L^*_f	a^*_f	b^*_f	EW^*_f
L^*_i	1.00	-0.30	-0.01	-0.17
a^*_i	-0.30	1.00	0.76	0.34
b^*_i	-0.01	0.76	1.00	0.20

Tabla V.5. Coeficientes de correlación entre los valores finales e iniciales de EW^* , L^* , a^* y b^* , para los caninos en el grupo de pacientes normales.

El coeficiente de correlación entre EW^*_f y L^*_i fue muy fuerte y negativo, mientras que fue débil y positivo con a^*_i y b^*_i . Por tanto, podemos señalar que el valor final del índice de blanqueamiento está influenciado, principalmente, por el valor inicial de la luminosidad del diente. Conforme al modelo obtenido ($EW^*_f = 77.74 - 0.71 \times L^*_i + 0.01 \times a^*_i + 0.35 \times b^*_i$) (ecuación IV.4.) los dientes más claros inicialmente, con valores de L^*_i superiores, son los que presentan los valores de EW^*_f menos elevados, como cabría esperar del resultado anterior. Es decir, presentarán menor distancia al blanco modelo (100,0,0). Además, como puede comprobarse en el modelo univariable para L^* ($L^*_f = 17.9 + 0.73 \times L^*_i$) (ecuación IV.11.), los estímulos de menor valor de L^*_i son los que presentan mayor variación en este parámetro y, por tanto, mayor variación en el índice de blanqueamiento.

De los modelos multivariados calculados para L^*_f y EW^*_f ($L^*_f = 20.36 + 0.73 \times L^*_i - 0.046 \times a^*_i - 0.14 \times b^*_i$ y $EW^*_f = 77.74 - 0.71 \times L^*_i + 0.01 \times a^*_i + 0.35 \times b^*_i$) (ecuaciones IV.3. y IV.4., respectivamente) podemos indicar que el proceso de blanqueamiento no trabaja tan eficientemente para los dientes relativamente luminosos. Este resultado viene confirmado por los modelos univariados calculados para la predicción de la variación del índice EW^* y de L^* a partir de sus valores iniciales

($\Delta EW^* = 7.03 - 0.24 \times EW_i^*$ y $\Delta L^* = 17.9 - 0.27 \times L_i^*$) (ecuaciones **IV.6.** y **IV.12.**, respectivamente). Las pendientes negativas indican que los dientes con mayor valor de L_i^* mostraron una menor variación efectiva tanto en el índice EW^* como en la luminosidad L^* y por tanto, podemos indicar que el tratamiento fue menos efectivo.

Nuestros resultados están de acuerdo con los obtenidos por Ishikawa-Nagai y cols. (Ishikawa-Nagai y cols., 2004a) quienes muestran que existe una correlación parcial moderada entre la diferencia de color tras el blanqueamiento y la luminosidad inicial del diente ($\Delta E^* = -0.31 \times L_i^* + 28.81$) siendo, por tanto, el tratamiento blanqueador más efectivo para los dientes que inicialmente son más oscuros. Además, este mismo trabajo muestra una fuerte correlación entre la diferencia de color y los valores iniciales de b^* ($\Delta E^* = 0.34 \times b_i^* + 3.73$) al igual que encontramos en nuestro estudio.

El objetivo inicial de este estudio era la obtención de fórmulas y/o algoritmos matemáticos que permitieran predecir el cambio cromático producido tras la aplicación de un gel a base de peróxido de carbamida al 20% dos horas al día durante dos semanas. En este sentido, los modelos lineales multivariantes expuestos anteriormente proporcionan los valores de cada una de las coordenadas CIELAB esperables tras el proceso de blanqueamiento, a partir de las coordenadas cromáticas iniciales del diente. Sin embargo, surge la necesidad de proporcionar una medida objetiva global en el espacio CIELAB del error cometido al utilizar estos modelos lineales que estiman el valor esperado para cada coordenada independientemente.

Dada la geometría euclídea del espacio CIELAB, es posible definir una medida del error cometido al estimar un valor en dicho espacio. En nuestro caso, esta medida consideraría el error cometido al estimar el color post-blanqueamiento real de cada diente (L_f^*, a_f^*, b_f^*) utilizando los valores obtenidos por los modelos lineales (estimaciones $\hat{L}_f^*, \hat{a}_f^*, \hat{b}_f^*$) utilizando la siguiente expresión (nótese que esta expresión coincide con la diferencia de color para este par de estímulos):

$$\text{Error cometido} = \sqrt{\left(\hat{L}_f^* - L_f^*\right)^2 + \left(\hat{b}_f^* - b_f^*\right)^2 + \left(\hat{a}_f^* - a_f^*\right)^2} \quad (\text{V.1.})$$

Utilizando dicha medida del error para cada diente, obtenemos un error estándar de 7.19 para el grupo de pacientes normales y de 5.60 para los pacientes tetraciclínicos.

De forma similar a la funcionalidad del coeficiente R^2 para modelos lineales, podemos estimar el porcentaje de la varianza multidimensional en los valores post-blanqueamiento (esto es, la media de la diferencia de color al cuadrado entre cada valor CIELAB post-blanqueamiento y la media de dichos valores post-blanqueamiento) explicado por estos modelos. El valor obtenido, que podemos denominar R^2 Multivariable ($L^*a^*b^*$), es de 0.51 para los pacientes normales y de 0.60 para los tetraciclínicos.

Conforme a este resultado, los modelos lineales propuestos, para el grupo de pacientes normales, explican un total del 51% de la varianza existente en los valores CIELAB post-blanqueamiento para los dientes y, por tanto, hay un 49% de varianza entre las mediciones pre- y post-blanqueamiento que no queda explicado por el color inicial del diente. Para el grupo de pacientes tetraciclínicos, un 60% de varianza existente entre las mediciones iniciales y finales quedaría explicada por los cambios en el color inicial de los dientes medidos, mientras que el 40% de la varianza restante no vendría explicada por dichos cambios tras el proceso de blanqueamiento dental.

Para dar significación al error estándar obtenido con los modelos lineales, para ambos grupos (7.19 para pacientes normales y 5.60 para tetraciclínicos), entendiéndolos como una distancia euclídea en el espacio CIELAB, podemos compararlo con las diferencias de color entre las tablillas de la guía Vitapan Classical[®], uno a uno, que es la que se emplea habitualmente para la medición subjetiva de los cambios cromáticos en un proceso de blanqueamiento dental.

La tabla **V.6.** muestra las diferencias en CIELAB (ΔE^*_{ab}) entre las tablillas de dicha guía de color.

	C4	A4	C3	B4	A3,5	B3	A3	D3	D4	C2	C1	A2	D2	B2	A1	B1
C4	0,00															
A4	8,46	0,00														
C3	11,38	4,15	0,00													
B4	16,09	7,76	6,75	0,00												
A3,5	14,36	5,94	4,23	2,87	0,00											
B3	14,91	6,52	5,10	1,69	1,29	0,00										
A3	21,33	13,13	10,09	7,20	7,33	7,25	0,00									
D3	20,76	13,06	9,44	8,76	7,92	8,22	3,03	0,00								
D4	20,73	12,72	9,42	7,08	7,14	6,98	1,89	2,89	0,00							
C2	19,92	11,97	8,55	7,01	6,53	6,62	2,09	1,92	1,43	0,00						
C1	21,44	14,57	10,53	11,57	10,33	10,76	6,42	3,54	5,69	5,01	0,00					
A2	25,63	17,73	14,27	12,11	12,15	12,13	4,97	4,97	5,41	5,80	6,21	0,00				
D2	24,91	17,76	13,85	13,77	12,98	13,28	7,21	5,13	6,99	6,77	3,57	4,28	0,00			
B2	27,01	19,14	15,63	13,37	13,55	13,46	6,36	6,41	6,60	7,17	7,15	1,62	4,71	0,00		
A1	28,87	21,48	17,66	16,59	16,31	16,41	9,57	8,50	9,57	9,81	7,59	4,84	4,12	3,92	0,00	
B1	25,71	18,89	14,86	15,26	14,39	14,69	8,93	6,73	8,48	8,30	4,34	5,85	1,89	5,90	4,10	0,00

Tabla **V.6.** Diferencias de color CIELAB entre los tonos VITA de la guía Vitapan Classical® (ΔE^*_{ab}).

Así, se observa que el error asociado al modelo lineal predictivo establecido (7,19 para pacientes normales y 5,60 para tetraciclínicos) y, como se verá más adelante en el modelo difuso diseñado, puede ser, en algunos casos, superior al error cometido cuando el operador realiza la determinación subjetiva utilizando las tablillas de la guía Vitapan Classical® para valorar el cambio cromático. Así, por ejemplo, y como caso extremo, si el modelo lineal nos dijese que el color final esperado es un C2 (coordenadas cromáticas estimadas próximas al C2), tenemos que el A3, el D3 y el D4 tienen diferencias muy pequeñas con respecto al C2, por lo que en ese caso, no es posible aproximar de forma exacta el color post-blanqueamiento esperado con nuestros modelos lineales.

Continuamos la discusión de los resultados de los atributos cromáticos *croma* C^* y *ángulo de tono* h^o , para los que hemos calculado un modelo regresor lineal univariable, los cuales permiten estimar las variaciones en C^* y h^o tras el proceso de blanqueamiento ($\Delta C^* = 4.20 - 0.49 \times C^*_i$ y $\Delta h^o = 22.3 - 0.35 \times h^o_i$) (ecuaciones **IV.8.** y **IV.10.**, respectivamente). La tendencia para el croma es similar a la observada en el índice de blanqueamiento EW^* , aunque más acusada. La pendiente negativa que presentan nuestras medidas de todo el conjunto de datos indica que los dientes más saturados antes del proceso de blanqueamiento sufren un mayor cambio en el croma tras el mismo. Recientemente, Ontiveros y Paravina (Ontiveros y Paravina, 2009) han publicado un estudio clínico en el que concluyen que los cambios cromáticos que se producen tras el blanqueamiento dental están más influenciados por los cambios en el croma que por los cambios en la luminosidad y ángulo de tono ($\Delta E_{ab}^* = 0.51 \times \Delta L^* - 0.98 \times \Delta C^* + 0.02 \times \Delta h^o$). Sin embargo, este estudio no aporta ninguna información sobre los cambios producidos dependiendo del croma inicial del diente como hemos establecido en nuestro trabajo.

Con respecto a esto último, si bien nuestros resultados experimentales coinciden con la observación subjetiva en clínica, es decir, que los dientes más saturados y menos luminosos son los que experimentan una mayor variación cromática, debemos señalar la escasez de ensayos clínicos disponibles que corroboren de forma objetiva nuestros resultados. Así, los estudios de Gerlach y cols. (Gerlach y cols., 2000; Gerlach y cols., 2002) concluyeron que, tras la aplicación de un blanqueamiento dado, se produjo una importante reducción del parámetro b^* y que esto, a su vez, se correlacionó con una mayor percepción clínica del cambio cromático tras el tratamiento. Los estudios posteriores de Ishikawa-Nagai y cols. (Ishikawa-Nagai y cols, 2004a; Ishikawa-Nagai y cols, 2004b) encontraron una fuerte correlación entre el cambio cromático y la coordenada b^* , demostrando que el tratamiento fue más eficaz para los dientes con un tono inicial amarillo. También los resultados de Goodson y cols. (Goodson y cols., 2005) mostraron que los dientes con un mayor valor inicial de b^* y, por tanto, con un mayor croma inicial, experimentaron un mayor cambio cromático tras el blanqueamiento dental.

El modelo regresor para el *ángulo de tono* h° indica que existe una correlación negativa, al igual que para el croma, sin embargo, en este caso la interpretación es distinta debido al punto de corte con el valor $\Delta h^{\circ}=0$. Así, los especímenes con menor ángulo de tono inicial (de tonalidad más rojiza) tienden a amarillear, mientras los especímenes con mayor ángulo de tono inicial tienden a una disminución de su ángulo de tono. Es decir, los dientes con un tono rojo tienden a hacerse menos rojos y los dientes con un tono amarillo, tienden a hacerse menos amarillos, produciéndose una homogeneización del ángulo de tono próximo a 62° , tal y como se observa en la figura **IV.32**.

Si bien cualitativamente los modelos regresores para ambos grupos de pacientes muestran tendencias similares, cuantitativamente difieren para todos los parámetros estudiados. Es decir, las variaciones de color en el grupo de tetraciclínicos tras el blanqueamiento, en principio, son menos acusadas que en el grupo de pacientes normales. No obstante, se hace difícil la comparación entre nuestros resultados y los encontrados en la literatura para este tipo de pacientes, ya que los objetivos y protocolos que se emplean en la mayoría de estos estudios, para la aplicación del agente blanqueador y la medición del cambio cromático dental, difieren del aplicado en nuestro trabajo.

Nuestro estudio demuestra que es posible predecir los cambios en las coordenadas cromáticas cuando se emplean sistemas de blanqueamiento que contienen peróxido de carbamida al 20%, con una incertidumbre (error estándar) en el valor final de color, en CIELAB de 7.19 para el grupo de pacientes normales y de 5.60 para los pacientes tetraciclínicos. Estas incertidumbres pueden estar asociadas a factores exógenos relacionados con el paciente con la técnica clínica, o condiciones a la hora de medir que no podemos controlar al 100%. Por ejemplo, la higiene bucal diaria de los participantes, el cumplimiento estricto de los consejos dietéticos durante el tratamiento blanqueador, leves movimientos del paciente durante la medida, etc. En cualquier caso, teniendo en cuenta las dificultades planteadas en todo estudio clínico *in vivo*, consideramos que la bondad de los modelos es aceptable dado el proceso biológico estudiado. Además los modelos univariados estudiados muestran con certeza (véase los intervalos de confianza de los coeficientes para las ecuaciones **IV.6.**, **IV.8.** **IV.18.** y **IV.20.**, que son negativos) que los dientes más cromáticos son los que presentan una mejor respuesta al

blanqueamiento y que, tras dicho proceso, se produce una homogeneización, en global, del tono de los dientes estudiados.

Sin embargo, los modelos de regresión obtenidos están basados en medidas instrumentales. Su aplicabilidad clínica, es decir, su utilización para predecir el cambio cromático esperado en un paciente dado, está limitada por la necesidad de realizar mediciones objetivas del diente (coordenadas cromáticas pre-blanqueamiento) y conocimientos en Colorimetría. En este contexto, sería de gran interés conocer la asociación entre medidas instrumentales y las tablillas de las guías comerciales que se utilizan en clínica para la determinación cromática pre-blanqueamiento y post-blanqueamiento. Esta asociación permitiría establecer directrices objetivas para que, una vez definida la tablilla más cercana al color de partida del paciente, tanto éste como el dentista, conozcan *a priori* el color esperable (tablilla post-blanqueamiento), tras el tratamiento blanqueador.

Desde su aparición (Zadeh, 1965), cada vez es más frecuente el uso de la *lógica difusa* en el campo de la Óptica y la Colorimetría. Los sistemas de inferencia difusa optoelectrónicos se han usado en algunos trabajos para aplicaciones de control (Zalevsky y cols, 2006), aunque tradicionalmente la optimización e implementación de estos sistemas a partir de un conjunto de muestras se realiza mediante métodos numéricos, sobre los que existe una extensa bibliografía (Wang, 1994; Pomares y cols, 2002; Herrera y cols, 2005). Por otro lado, para problemas de nombrado del color (*color naming*) se ha diseñado una partición difusa del espacio cromático CIELAB a partir de la estimación de valores de pertenencia asociados a un conjunto de mediciones subjetivas realizadas (Benavente y cols., 2006; Menegaz y cols., 2007).

Por todo lo anterior, entre los objetivos de nuestro trabajo planteamos la aplicación de esta metodología a la predicción del proceso de blanqueamiento dental.

V.3. Inferencia difusa para la predicción del cambio cromático tras el blanqueamiento dental

En el campo de la Odontología, existen pocos trabajos que empleen la metodología difusa. Específicamente, los trabajos disponibles los encontramos en el área de la Periodoncia, y están relacionados con la aplicación de modelos difusos para la caracterización de la superficie dental (Strackeljan y cols., 1997) y, para la detección y cuantificación de la placa dental (Kang y cols., 2009).

Mediante lógica difusa hemos establecido una asociación entre las medidas instrumentales y las tablillas de la guía comercial más utilizada. En concreto, hemos diseñado un sistema de reglas difusas cuyos antecedentes se corresponden con las medidas en CIELAB de las tablillas de la guía Vitapan Classical[®]. El modelo de reglas diseñado fue entrenado utilizando el conjunto de datos disponibles pre y post-blanqueamiento de los dientes objeto de estudio, de forma que es capaz de aproximar, al igual que los modelos de regresión multivariantes obtenidos, el cambio de color esperable a partir de los valores cromáticos pre-blanqueamiento de cada diente del estudio.

La utilización de conjuntos difusos centrados en los valores CIELAB de las tablillas VITA y, gracias a la modificación estructural del modelo difuso efectuada para obtener un modelado global y local simultáneo, hace que, en el entrenamiento del modelo, se efectúe una inferencia local del color final esperable para cada tablilla pre-blanqueamiento (según los dientes que pueden asociarse a dicha tablilla), a la vez que, globalmente, se aproxima el color post-blanqueamiento para cualquier valor inicial en el espacio considerado. Esto es, del conjunto de reglas definidas anteriormente (ecuación **IV.34.**), se obtienen de inmediato los valores CIELAB post-blanqueamiento esperables para un diente que se pueda asociar *inequívocamente* a una tablilla VITA de la guía Vitapan Classical[®], siendo éstos además, parámetros de la estructura del modelo predictor del color post-blanqueamiento esperado.

La construcción de este sistema difuso obtuvo, como se comentó, valores de error estándar similares a los obtenidos por los modelos lineales. Según la ecuación (V.1.), el error estándar en CIELAB obtenido con el modelo difuso es de 7.42, con un coeficiente de determinación R^2 Multivariable ($L^*a^*b^*$) de 0.48. Conforme a este último resultado, el modelo difuso propuesto explicaría el 48% de la varianza existente en los valores CIELAB post-blanqueamiento para los dientes objeto de estudio, mientras que el 52% de la varianza restante no vendría explicada por el color inicial de los dientes medidos.

Como ya vimos en el capítulo de Resultados, los errores estándar obtenidos en la aproximación difusa fueron: 6.93, 1.37 y 2.25 para L^* , a^* y b^* , respectivamente. Los errores obtenidos para los modelos lineales en el grupo de pacientes normales fueron 6.72, 1.41 y 2.15 para L^* , a^* y b^* , respectivamente. Estos errores, similares para los modelos lineales y el modelo difuso, sugieren, a primera vista, la posible ausencia de relaciones no lineales entre los valores pre- y post-blanqueamiento para el conjunto de datos disponible. En este caso, el sistema de reglas obtenido proporciona información directa y relevante para el experto, aunque no implica una mejora directa en el rendimiento del modelo en comparación con los modelos lineales calculados.

En este sentido, debemos señalar que, tal y como se observa en las figuras IV.28. y IV.29., la distribución de las tablillas VITA en la región del espacio cromático que ocupan nuestras muestras era insuficiente, quedando zonas sin cubrir correctamente. Esto es, no se encontró una correspondencia inmediata, entre algunos de los valores de las coordenadas cromáticas medidas en los dientes objeto de estudio y los correspondientes de las tablillas de la guía Vitapan Classical[®]. Esto era esperable ya que, como es bien conocido, el espacio cromático dental no está bien representado en las guías comerciales (Paravina, 2008).

Hay que resaltar además que un entrenamiento óptimo en rendimiento de un *sistema difuso TSK* también tendría que localizar la posición óptima de los antecedentes de las reglas (Wang, 1994; Pomares y cols., 2002; Herrera y cols., 2005). El fijar los centros de las reglas para que identifiquen las tablillas VITA de la guía Vitapan Classical[®] proporciona entendimiento y utilidad al modelo, pero no garantiza un rendimiento óptimo desde el punto de vista de mínimos cuadrados

(Pomares y cols., 2002; Herrera y cols., 2005). No obstante, el diseño preciso de un modelo de aproximación no lineal requiere de disponer de un conjunto de datos de validación y otro de test relevantes para diseñar adecuadamente el modelo. En este problema, se dispone de un solo conjunto de datos con una alta dispersión, lo que reduce la posibilidad de realizar una adecuada división de éstos, para la generación de conjuntos de validación y de test, y dificulta un estudio más en profundidad sobre los parámetros no lineales óptimos del modelo (número de reglas y centros de éstas). Algunas pruebas realizadas anteriormente sobre estos datos utilizando modelos difusos más complejos, mostraron que es posible mejorar el rendimiento de los modelos aquí expuestos, aunque no proporcionarían información tan directa y usable como lo expuesto en este trabajo y se ha dejado su estudio para trabajos futuros.

Sería de interés la realización de estudios más en profundidad, que minimicen las dificultades antes mencionadas, además de proporcionar información más precisa sobre el comportamiento real del proceso de blanqueamiento utilizando modelos de predicción más avanzados incluyendo, por supuesto, herramientas de modelado neuro-difuso. Cualitativamente, sin embargo, el modelo difuso diseñado proporciona una mejora esencial desde el punto de vista de usabilidad para el experto, al proporcionar una herramienta de utilidad directa debido a la asociación entre tablillas VITA de entrada y valores CIELAB post-blanqueamiento.

Volviendo a la discusión de los resultados obtenidos, obtenemos que adicionalmente, es posible estimar la asociación difusa de los valores post-blanqueamiento en CIELAB predichos con tablillas de la guía Vitapan Classical[®]. Esta asociación se extrae mediante la fuzzificación (borrosificación o difusificación) de los valores CIELAB utilizando los conjuntos difusos creados para las tablillas de la Vitapan Classical[®]. La tabla **V.7.** muestra las tablillas VITA con mayor correspondencia con cada consecuente post-blanqueamiento de las reglas obtenidas en el entrenamiento del modelo difuso. Esta información muestra los tonos VITA post-blanqueamiento esperables, tras el tratamiento blanqueador, para cada tono VITA pre-blanqueamiento, junto con los valores de función de pertenencia para cada tono VITA seleccionado, siempre según el particionamiento del espacio de CIELAB diseñado, y según las limitaciones ya mencionadas de este estudio.

Vitapan Classical®			
Pre-blanqueamiento.	Post-blanqueamiento		
Tono	Tono 1	Tono 2	Tono 3
C4	C3 (0.71)	C4 (0.29)	
A4	C3 (0.77)	C4 (0.22)	
C3	C1 (0.52)	B1 (0.23)	A1 (0.09)
B4	C2 (0.34)	A3 (0.28)	D4 (0.18)
A3,5	D3 (0.57)	C2 (0.12)	A2 (0.10)
B3	C2 (0.47)	D4 (0.15)	A3 (0.15)
A3	B2 (0.78)	A2 (0.19)	
D3	B1 (1.00)		
D4	B1 (0.72)	A1(0.24)	
C2	A2 (0.55)	B2(0.38)	
A2	A1 (0.65)	B1(0.31)	
B2	A1 (0.79)	B1(0.21)	

Tabla V.7. Tonos VITA post-blanqueamiento esperados para cada tono VITA pre-blanqueamiento.

Del conjunto de reglas extraídas que se muestran en la tabla V.7., se puede deducir que, por ejemplo, para un tono inicial A3, el tono final esperable estaría entre un B2 y un A2, siendo mayor la probabilidad de que se pueda considerar un B2 (valor de pertenencia a dicho conjunto difuso de 0.78), según la definición de los conjuntos difusos empleada para la construcción de nuestro modelo difuso.

Queremos señalar que la lectura de la tabla de resultados no debe realizarse desde la perspectiva de la ordenación lineal de las tablillas, según L^* , usada habitualmente en clínica, sino desde las tres dimensiones del espacio cromático que ha sido considerado en nuestro estudio. Además del carácter tridimensional del espacio cromático, hay que considerar en la interpretación de esta tabla de resultados que las diferencias de color entre tablillas contiguas no son constantes, como por ejemplo, el pequeño cambio aparente experimentado por C4, con

predicción de cambio hacia C3. Analizando la medida instrumental de ambas tablillas (tabla V.6.), comprobamos que la diferencia de color es superior a 11 unidades CIELAB.

De entre los resultados mostrados en la tabla V.7., quisiéramos destacar el resultado predictivo para el tono D3, color que es bastante frecuente en nuestra población. Nuestro modelo predice que, si el tono pre-blanqueamiento es un D3, el tono post-blaqueamiento esperado será un tono B1 tras la aplicación del protocolo establecido en nuestro estudio independientemente del error que pueda ocurrir en dicha predicción.

Como ya hemos comentado anteriormente, mientras que lo habitual en la consulta dental sea la determinación subjetiva del color mediante guías, sería de gran utilidad el encontrar una asociación directa y precisa entre éstas y la medición objetiva que aportan los diferentes dispositivos disponibles en el mercado. Por ello consideramos que, el enfoque propuesto representa una aportación metodológica novedosa y de gran interés para el modelado del color en la práctica odontológica. En concreto, el modelo propuesto supone una notable aportación en el ámbito de la Estética Dental, ya que podría proporcionar al dentista clínico nuevas herramientas para soslayar uno de los problemas que plantea el blanqueamiento como tratamiento, y que no es otro que la imposibilidad de conocer *a priori* el resultado tras su aplicación.

Para finalizar, pensamos que la metodología de modelado de cambio de color propuesta, basada en lógica difusa, podría ser de gran interés en otras disciplinas que requiera predecir y describir cambios cromáticos debidos a un determinado proceso físico, químico o un proceso natural. Específicamente, en el contexto de la Odontología, este trabajo podría aplicarse a otras guías comerciales, así como al desarrollo de nuevas guías que permitan una mejor evaluación de los cambios cromáticos producidos con el blanqueamiento dental.

Conclusiones

En este estudio, hemos trabajado con las coordenadas cromáticas en CIELAB obtenidas antes y tras la aplicación de una pauta de blanqueamiento dental dada. A continuación, se exponen las conclusiones principales derivadas del presente trabajo de investigación.

- ❖ Para la realización de este trabajo se ha puesto a punto un nuevo método experimental de medida que minimiza en gran medida las deficiencias observadas en métodos previos para la medición del color dental *in vivo*.
- ❖ La caracterización del proceso del blanqueamiento dental, desde un punto de vista colorimétrico, permite afirmar que se produce una respuesta objetiva de los dientes al agente blanqueante. De forma global, hemos observado que los dientes sufren una desaturación y un aumento de su luminosidad, estando estas variaciones, en general, por encima del umbral de perceptibilidad. Estas tendencias se observan tanto en el grupo de pacientes normales como en el de tetraciclínicos.
- ❖ Por primera vez, se han obtenido *modelos de inferencia estadística lineales multivariantes* que, a partir de las coordenadas cromáticas iniciales, permiten estimar las coordenadas cromáticas finales del diente sometido al proceso blanqueador. Es de destacar, que el cambio experimentado en la luminosidad, según estos modelos, sólo depende de la luminosidad inicial del diente y, en general, a menor luminosidad inicial mayor es dicho cambio.
- ❖ Adicionalmente, se obtuvieron *modelos de inferencia estadística lineales univariantes* para explicar las variaciones en los atributos cromáticos, croma, tono y luminosidad, inducidas por el proceso de blanqueamiento en el diente. Estos modelos proporcionan resultados basados en evidencia que muestran que los dientes más saturados y menos luminosos son los que experimentan un cambio más acusado.
- ❖ Se ha propuesto un *índice de blanqueamiento (EW*)* basado en el espacio CIELAB que proporciona una valoración del cambio cromático experimentado por el diente mediante un valor numérico único.
- ❖ En el presente trabajo se ha realizado una propuesta, la de asociar medidas de color objetivas y subjetivas, y en una primera aproximación, se ha resuelto mediante *lógica difusa*. En este sentido, se ha diseñado un modelo que, trabajando internamente con medidas colorimétricas, proporciona las

coordenadas cromáticas finales a partir de las iniciales, pero que, además, asocia dichas medidas a las tablillas de una guía comercial. De esta forma, se proporciona a los expertos información sobre el proceso de blanqueamiento en términos de la guía de color estudiada, que es una de las de mayor uso en la clínica dental.

- ❖ Esta metodología propuesta, pese a no presentar un avance en rendimientos respecto de los modelos lineales diseñados, sí que constituye una solución viable a problemas muy importantes relacionados con estudios de color tales como la subjetividad inherente a la valoración visual del color y, a la predicción y análisis del cambio cromático en procesos físicos, químicos o naturales.

- ❖ Desde el punto de vista clínico, si bien nuestro trabajo ha dado como consecuencia modelos predictivos sin una inmediata aplicabilidad clínica, sí supone un notable avance en el conocimiento del comportamiento cromático del diente en un protocolo clínico de blanqueamiento dental. Además, los avances metodológicos introducidos en este trabajo abren una nueva vía para la generación de conocimiento preciso, comprensible y útil para los expertos en este ámbito, gracias a la asociación difusa de medidas colorimétricas y patrones de color conocidos y perceptibles para el humano (guías de color). Estos avances, igualmente, podrían ser aplicados en el estudio de otros fenómenos biológicos en el ámbito de la Odontología.

Anexos

Anexo 1¹



Universidad de Granada
Vicerrectorado de Investigación
y Tercer Ciclo

COMISIÓN DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN
DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

La Comisión de Ética en Investigación de la Universidad de Granada, oído el informe preliminar del Presidente del Comité en Investigación Humana, emite informe favorable a la metodología en la investigación titulada "Evaluación de la eficacia de un tratamiento blanqueador. Estudio de predicción de resultados" que dirige D./Dña. Rosa María Pulgar Encinas.

Granada a 13 de junio de 2007



EL PRESIDENTE
Fdo: Rafael Páya Albert



LA SECRETARIA
Fdo: Mª Concepción Iribar Ibabe

¹ En el presente informe aparece un título preliminar del plan de trabajo, que posteriormente ha sido modificado por el actual: "Blanqueamiento Dental: estudio clínico para el desarrollo de métodos estadísticos e inteligentes para la predicción del cambio cromático".

Anexo 2

“EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE UN TRATAMIENTO BLANQUEADOR. ESTUDIO DE PREDICCIÓN DE RESULTADOS”

HOJA DE INFORMACIÓN PARA LOS PARTICIPANTES

El objetivo de este estudio clínico es evaluar la eficacia de un tratamiento de blanqueamiento dental. Para ello se solicitará la participación de pacientes que, de forma voluntaria, recibirán el tratamiento.

El tratamiento empleado no tiene carácter experimental, sino que es uno de los que se usa en la práctica odontológica habitual. Éste consiste en aplicar el agente blanqueante con férulas en casa, 2 horas al día durante 14 días. Previamente al paciente se le realizará una limpieza dental y se le tomarán impresiones para la confección de cubetas individualizadas.

La limpieza dental será realizada en la Facultad de Odontología, mientras que las medidas del color se realizarán en el Departamento de Óptica de la Facultad de Ciencias, al que tendrá que acudir en sucesivas visitas.

Los pacientes que participen en este estudio se beneficiarán en la medida en que van a recibir una completa revisión bucodental, con limpieza, además de mejorar uno de los aspectos más importantes en la estética oral: el color de los dientes.

Como posibles efectos adversos de este tipo de tratamientos, el paciente puede experimentar sensibilidad dentaria y ligera irritación en las encías. No obstante, ambos suelen ser transitorios y de baja intensidad. Ninguno de los procedimientos a los que se les someterán serán dolorosos ni precisarán anestesia alguna.

Además, el paciente podrá revocar el consentimiento y retirarse del estudio en cualquier momento, sin que por ello se altere la relación odontólogo-paciente.

Los datos que obtendremos en las diferentes visitas serán archivados para posteriormente utilizarlos, con carácter confidencial. Tendrán acceso a ellos exclusivamente los investigadores vinculados al estudio.

En el supuesto de duda o consulta alguna durante el tratamiento, el paciente podrá ponerse en contacto con uno de los investigadores en la Facultad de Odontología. Para ello, se le proporcionará a cada voluntario un teléfono de contacto.

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Título del estudio clínico “EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE UN TRATAMIENTO BLANQUEADOR. ESTUDIO DE PREDICCIÓN DE RESULTADOS”

Yo..... con DNI.....

Declaro que:

He leído la hoja de información que se me ha entregado.

He podido hacer preguntas sobre el estudio.

He recibido suficiente información sobre el estudio.

He hablado con.....

Comprendo que mi participación es voluntaria.

Comprendo que puedo retirarme del estudio:

1. Cuando quiera
2. Sin tener que dar explicaciones
3. Sin que esto repercuta en mis cuidados odontológicos

Presto libremente mi conformidad para participar en el estudio.

Fecha

Firma del paciente

Anexo 3

Nº. HISTORIA

Nombre _____ Apellidos _____
 C/ _____ N° _____ C.P. _____
 Ciudad _____ Telfs. de contacto _____
 Profesión _____ Fecha nacimiento _____

HISTORIAL MÉDICO

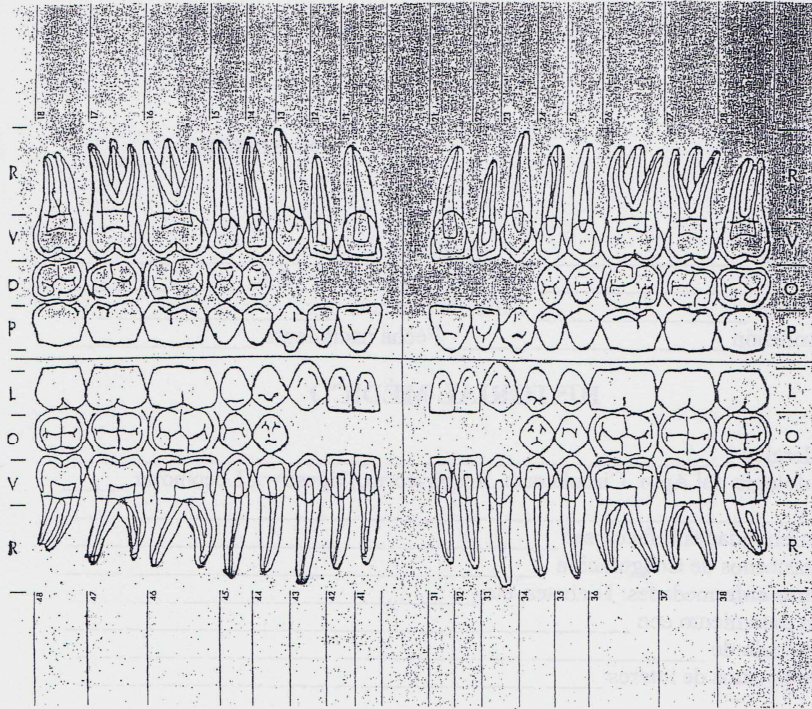
Alergias _____
 Patología del Apto. Circulatorio, Respiratorio, Digestivo, Locomotor _____

 Enfermedades Infecciosas _____
 Trastornos de Coagulación _____
 Otras enfermedades: Diabetes, etc. _____
 En tratamiento con _____
 Operado de _____
 Otros datos de interés _____

HISTORIAL ODONTOLÓGICO

Estado de higiene oral: Bueno Regular Malo
 N° Limpiezas anteriores _____
 Sangrado espontáneo de las encías _____
 Sensibilidad dental _____
 Historia previa de blanqueamiento dental _____
 Tratamiento ortodóntico anterior _____
 Portador de prótesis _____
 Patología de la ATM _____
 Lesiones en tejidos y mucosa oral _____
 Otros datos de interés _____

Firma del paciente



Necesita tratamiento:

- | | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Extracciones | <input type="checkbox"/> Conservadora | <input type="checkbox"/> Prótesis |
| <input type="checkbox"/> Implantes | <input type="checkbox"/> Ortodoncia | <input type="checkbox"/> Periodoncia |
| <input type="checkbox"/> Otro tipo de tratamiento _____ | | |

Registro de color dental:

1° Día: _____
 2° Día: _____
 3° Día: _____

Efectos secundarios:

Sensibilidad dental _____
 Irritación gingival _____
 Otros _____

Anexo 4

CUESTIONARIO

1. ¿Ha fumado alguna vez? En caso afirmativo, indique con qué frecuencia:

- No Sí, menos de 5 cigarrillos/día Sí, más de 5 cigarrillos/día
 Ocasionalmente (fiestas, fines de semana,...)

2. ¿Toma usted café, té o infusiones a diario? En caso afirmativo, indique con qué frecuencia:

- No Sí, menos de 3 veces/día Sí, más de 3 veces/día

3. ¿Toma usted bebidas carbónicas o isotónicas (ej. Coca cola, acuarios, etc) a diario? En caso afirmativo, indique con qué frecuencia:

- No Sí, menos de 3 veces/día Sí, más de 3 veces/día

4. Señale entre los siguientes alimentos, los que toma a diario:

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Vino tinto, 1 copa/día | <input type="checkbox"/> Vino tinto, 2 o más copas/día |
| <input type="checkbox"/> Alcachofas | <input type="checkbox"/> Remolacha |
| <input type="checkbox"/> Zanahorias | <input type="checkbox"/> Espinacas |
| <input type="checkbox"/> Chocolate y cacao | <input type="checkbox"/> Fresas y frutas del bosque |

5. ¿Utiliza algún enjuague bucal diariamente? En caso afirmativo, indíquenos el nombre del producto

- No Sí,

Anexo 5

INSTRUCCIONES DE MANEJO, CUIDADO Y MANTENIMIENTO DE LAS CUBETAS PARA BLANQUEAMIENTO DENTAL AMBULATORIO

DESCRIPCIÓN

Una *cubeta de blanqueamiento dental* es un dispositivo en forma de herradura de acrílico blando transparente que tiene grabadas las huellas de sus dientes para adaptarse perfectamente a ellos y sirve de vehículo para llevar un gel blanqueador a los dientes.

INSTRUCCIONES DE MANEJO, CUIDADO Y MANTENIMIENTO

Durante el tratamiento, deberá seguir detenidamente las siguientes instrucciones:

Adaptación y acostumbramiento

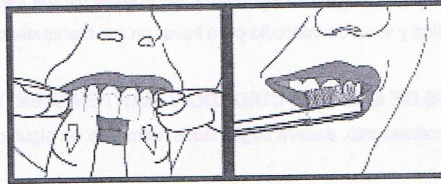
- Al colocar las férulas en la boca se suele producir un aumento de saliva, como ocurre con cualquier cuerpo extraño. Esta mayor salivación disminuirá con el paso del tiempo y en el transcurso de los días, al acostumbrarse a ellas.
- Del mismo modo, puede tener dificultades para hablar, que también se reducen en el transcurso del tratamiento.

Uso, colocación, desinserción

- Antes de colocarse las férulas, debe cepillarse adecuadamente los dientes.
- Debe usar también seda dental para limpiar los espacios entre los dientes y facilitar el blanqueamiento en esta zona sombreada de los mismos.
- *¡No utilice colutorios que contengan clorhexidina ni agentes reveladores de placa bacteriana, ya que ambos pueden teñir los dientes!*



- Después de la higiene bucal, tome la cubeta, coloque una gota de gel blanqueador en la huella de cada diente, como se le ha indicado, lleve la cubeta a la boca e insértela en su sitio, y escupa el excedente de gel.
- Mantenga la cubeta en la boca durante el tiempo indicado.



- Pasado ese tiempo, quítese la cubeta con los dedos, procurando sacarla de los dos lados al mismo tiempo, para evitar retorcerla y rozarse en la encía, y enjuáguese bien la boca con agua preferiblemente templada
- Seguidamente, lave la cubeta también con agua, séquela y guárdela en su caja.

Cuidados

- **IMPORTANTE:** No coma con las férulas puestas, ni las tenga en la boca más tiempo que el que se le ha indicado en la clínica.
- La ingesta de alcohol está también especialmente desaconsejada durante el blanqueamiento.
- Respete las recomendaciones que se le han dado en relación a alimentos que conviene restringir durante y después del tratamiento.
- A veces se produce un aumento de la sensibilidad de los dientes durante el tratamiento o una ligera irritación gingival. En este caso, póngase en contacto con nosotros.

Higiene

- Las cubetas deben ser lavadas con agua tras cada uso, y secadas previamente a guardarlas en su caja.

RECOMENDACIONES DURANTE Y DESPUÉS DEL BLANQUEAMIENTO DENTAL DOMICILIARIO CON FÉRULAS

1. Durante el blanqueamiento:

- Cepille sus dientes de forma adecuada antes de colocarse las férulas.
 - Rellene las férulas con suficiente producto (una gotita por cada diente) para cubrir toda la superficie de los dientes a blanquear y reparta el producto de forma homogénea por todo el interior de las férulas (puede utilizar la punta de la jeringuilla)
 - Aplique cada una de las férulas sobre su arcada dentaria correspondiente.
 - Limpie los excesos de gel que rebosen sobre la encía con un cepillo de dientes seco o pañuelo de papel.
 - Utilice las férulas durante el número de horas recomendadas en cada caso por su dentista. Por favor, no modifique dicha pauta sin comunicárselo.
 - No tragar los excesos de gel que rebosan de la cubeta.
 - Cepille los dientes de forma adecuada una vez concluido cada periodo de tratamiento.
 - Limpie las férulas bajo el grifo después de su uso. No utilizar agua caliente para limpiarlas pues podrían desajustarse.
 - Es normal, en ocasiones, percibir un aumento temporal de la sensibilidad en los dientes al ingerir productos fríos, calientes o ácidos.
- En las sucesivas revisiones que realizaremos durante el tratamiento, iremos controlando tal eventualidad y ajustando la pauta de aplicación del producto blanqueador en función de estos parámetros.
- Durante el periodo de tratamiento, los dientes se vuelven más porosos para permitir la entrada del producto en su interior y blanquearlos. Por ello es fundamental evitar durante dicho

- periodo productos que puedan alterar el color del diente, como café, té, vino tinto, bebidas coloreadas,... y es necesario cepillarse los dientes cada vez que ocasionalmente se ingiera alguno de estos u otros alimentos y/o bebidas similares.
- Evite también la ingesta de cítricos o zumos de fruta ya que por su carácter ácido pueden aumentar la sensibilidad dentaria.
 - Para lograr el máximo efecto blanqueador y sobre todo su estabilidad en el tiempo, es esencial concluir todo el tratamiento sin interrumpirlo en ningún momento. La falta de aplicación del producto durante un día necesita de al menos tres días para recuperar de nuevo el efecto logrado hasta ese momento.
 - Recuerde, es fundamental acudir a las revisiones durante el periodo de tratamiento para evaluar los progresos, el estado de los dientes y encías y ajustar la pauta de aplicación del producto en función de lo anterior.
 - Mantenga el producto alejado del calor y/o luz solar directa. No lo congele.

2. Después del blanqueamiento:

- El paciente debe evitar la ingesta de bebidas y alimentos potencialmente discolorantes por lo menos durante 72 horas después de finalizar cada sesión de blanqueamiento.
- El paciente no debe fumar y debe extremar su higiene oral por lo menos una semana después de finalizar cada sesión de blanqueamiento, o durante el resto del tratamiento blanqueador si éste se combina con otras modalidades de

blanqueamiento dental domiciliario.

Alimentos prohibidos durante el tratamiento y en las 72 horas posteriores tras su conclusión:

- tabaco
- café
- té
- colas
- vino tinto y rosado
- mosto
- alcachofa
- remolacha
- cerezas
- fresas
- moras
- framбуesas
- granadas
- sandía
- uvas negras
- chocolate
- cacao
- zanahorias
- brócoli
- espinacas
- tomate frito
- tinta del calamar
- cualquier guiso realizado con colorante y/o azafrán (ejem. paella, estofados, etc.)
- cualquier alimento de fuerte coloración

Bibliografía

- ◆ Accornero N, Capozza M. OPTONET: neural network for visual field diagnosis. *Med Biol Eng Comput.* 1995; 33: 223-226.
- ◆ Adibfar A, Steele A, Torneck CD, Titley KC, Ruse D. Leaching of hydrogen peroxide from bleached bovine enamel. *J Endod.* 1992; 18: 488-491.
- ◆ Al-Qunalan TA, Matis BA, Cochran MA. In vivo kinetics of bleaching gel with three-percent hydrogen peroxide within the first hour. *Oper Dent.* 2003; 28: 236-241.
- ◆ Al-Qunalan TA. The effect of whitening agents on caries susceptibility of human enamel. *Oper Dent.* 2005; 30: 265-270.
- ◆ Amengual Lorenzo J, Forner Navarro L, Llena Puy MC. Asociación Valenciana de Blanqueamiento Dental, editora. "Manual Práctico de Blanqueamiento Dental". Valencia: Editorial; 2002.
- ◆ Amengual Lorenzo J, Llena Puy MC, Forner Navarro L. Reproducibilidad en la medición del color "in vitro" e "in vivo" mediante colorímetros específicos para uso dental. *RCOE.* 2005; 10 (3): 263-7.
- ◆ Amengual Lorenzo J, Forner Navarro L. Evolución de los criterios estéticos dento-faciales. *Rev. Asociación Universitaria Valenciana de Blanqueamiento Dental.* 2007; 3: 15-28.
- ◆ Ayoubi M, Isermann R. Neuro-fuzzy systems for diagnosis. *Fuzzy Sets Syst.* 1997; Vol. 89; 3: 289-307.
- ◆ Baratieri LN. Clareamiento dental. Chicago: Quintessence books, 1994.
- ◆ Basting RT, Rodrigues AL Jr, Serra MC. The effects of seven carbamide peroxide bleaching agents on enamel microhardness over time. *J Am Dent Assoc.* 2003; 134: 1335-1342.
- ◆ Belvedere P. Igualación de un diente natural para elaborar una restauración cerámica. 2005. Disponible en:
<http://www.kerrdental.com/images/products/demetronShadeLightLED1/pdf/backToTheBasics.pdf>
- ◆ Benavente R, Vanrell M, Baldrich R. A Data Set for Fuzzy Colour Naming. *Color Res Appl.* 2006; 31(1): 48-56.
- ◆ Bikdash M. A Highly Interpretable Form of Sugeno Inference Systems. *IEEE Trans Fuzz Syst.* 1999; 7(6): 686-696.

- ◆ Blekas K, Stafylopatis A, Kontoravdis D, Likas A, Karakitsos P. Cytological diagnosis based on fuzzy neural networks. *J Intelligent Systems*. 1998; 8: 1-2.
- ◆ Bowles WH, Ugwuneri Z. Pulp chamber penetration by hydrogen peroxide following vital bleaching procedures. *J Endod*. 1987; 13: 375-377.
- ◆ Buckley J. Universal fuzzy controllers. *Automatica* 1992; 28(6): 1245-1248.
- ◆ Burkinshaw SM. Colour in relation to dentistry. *Fundamentals of colour science*. *Br Dent J*. 2004; 196(1): 33-41.
- ◆ Castro LJ. Fuzzy logic controllers are universal approximators. *IEEE Trans Syst Man Cybern*. 1995; 25(4): 629-635.
- ◆ Cavalli V, Reis AF, Giannini M, Ambrosano GM. The effect of elapsed time following bleaching on enamel bond strength of resin composite. *Oper Dent*. 2001; 26: 597-602.
- ◆ CIE Technical report: Industrial color-difference evaluation. CIE Pub N°116. CIE Central Bureau, Vienna, Austria. 1995.
- ◆ CIE Publ. 142-2001. "Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna, Austria. 2001.
- ◆ CIE Technical report 15.3:2004. Colorimetry.
- ◆ Condés E. La bioestadística: una herramienta fundamental en la elaboración de artículos radiológicos. *Radiología*. 2008; 50: 265-270.
- ◆ Corbalán M, Millán MS, Yzuel MJ. Color image acquisition by chargecoupled device cameras in polychromatic pattern recognition. *Opt Eng*. 1996; 35: 754-760.
- ◆ Córdón O, Herrera F, Hoffmann F y Magdalena L. *Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases*. Singapore: World Scientific, 2001.
- ◆ Dahl JE, Pallesen U. Tooth Bleaching. A Critical Review of the Biological Aspects. *Crit Rev Oral Biol Med*. 2003; 14(4):292-304.
- ◆ Devigus A. La medición digital del color en odontología. *Quintessence (ed. esp.)* 2004; 17(5): 281-286.
- ◆ Dishman MV, Covey DA, Baughan LW. The effects of peroxide bleaching on composite to enamel bond strength. *Dent Mater*. 1994; 10: 33-36.
- ◆ D'Negri CE, De Vito EL. Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Argentina de Medicina Respiratoria*. 2006; 4: 126-136.

- ◆ Douglas RD. Precision of in vivo colorimetric assessments of teeth. *J Prosthet Dent.* 1997; 77: 464-470.
- ◆ Douglas RD, Brewer JD. Acceptability of shade differences in metal ceramic crowns. *J Prosthet Dent.* 1998; 79: 254-260.
- ◆ Driankov D, Hellendoorn H, Reinfrank M. An introduction to fuzzy control. Springer Verlag, 1993.
- ◆ Ernst CP, Marroquin BB, Willershausen-Zonnchen B. Effects of hydrogen peroxide-containing bleaching agents on the morphology of human enamel. *Quintessence Int.* 1996; 27: 53-56.
- ◆ García JA, Rubino M, Romero J, Hita E. Measuring the Whiteness of Human Teeth. *Color Res Appl.* 1993; 18: 349-352.
- ◆ García-Feijó J, Camona Suárez EJ, Gallardo LM, González Hernández M, Fernández Vidal A, González de la Rosa M, Mira Mira J, García Sánchez J. Desarrollo de un sistema automático de discriminación del campo visual glaucomatoso basado en un clasificador neuro-fuzzy. *Arch Soc Esp Oftalmol* vol 77, n 12. Madrid dic. 2002.
- ◆ Gerlach RW, Giba RD, Sagel PA. A randomized clinical trial comparing a novel 5.3% hydrogen peroxide bleaching strip to 10%, 15% and 20% carbamide peroxide tray-based bleaching systems. *Compend Contin Educ Dent.* 2000; 21: S22-28.
- ◆ Gerlach RW, Barker ML, Sagel PA. Objective and subjective whitening response of two self-directed bleaching systems. *Am J Dent.* 2002; 15: 7A-12A.
- ◆ Golub G, Loan C. Matrix Computations. The Johns Hopkins University Press, 1961.
- ◆ Gokay O, Mujdeci A, Algn E. Peroxide penetration into the pulp from whitening strips. *J Endod.* 2004; 30: 887-889.
- ◆ Goodkind RJ, Schwabacher WB. Use of a fiberoptic colorimeter for an in vivo color measurement of 2830 anterior teeth. *J Prosthet Dent.* 1987; 58(5): 535-542.
- ◆ Goodson JM, Tavares M, Sweeney M, Stultz J, Newman M, Smith V, et al. Tooth whitening: tooth color changes following treatment by peroxide and light. *J Clin Dent.* 2005; 16: 78-82.

- ◆ Hasegawa A, Motonomi A, Ikeda I, Kawaguchi S. Color of natural tooth crown in Japanese people. *Color Res Appl.* 2000a; 25: 43-48.
- ◆ Hasegawa A, Ikeda I, Kawaguchi S. Color and translucency of in vivo natural central incisors. *J Prosthet Dent.* 2000b; 83(4): 418-423.
- ◆ Hassel AJ, Koke U, Schmitter M, Beck J, Rammelsberg P. Efecto clínico de diferentes sistemas de guías de colores sobre las tonalidades dentarias de las restauraciones con recubrimiento cerámico. *Revista Internacional de Prótesis Estomatológica. Edición Hispanoamericana*, 2006; 8(2): 164-168.
- ◆ Hasson H, Ismail AI, Neiva G. Home-based chemically-induced whitening of teeth in adults. *Cochrane Database Syst Rev.* 2006 Oct 18; (4):CD006202.
- ◆ Haykin S. *Neural Networks.* Prentice Hall, 1998.
- ◆ Haywood VB, Heymann HO. Nightguard vital bleaching. *Quintessence Int.* 1989; 20(3): 173-176.
- ◆ Haywood VB. Nightguard vital bleaching: how safe is it?. *Quintessence Int.* 1991; 22: 515-523.
- ◆ Haywood VB. History, safety and effectiveness of current bleaching techniques and applications of the nightguard bleaching technique. *Quintessence Int.* 1992; 23: 471-488.
- ◆ Haywood VB, Leonard RH, Nelson CF, Brunson WD. Effectiveness, side effects and long-term status of nightguard vital bleaching. *J Am Dent Assoc.* 1994; 125: 1219-1226.
- ◆ Haywood VB. Nightguard vital bleaching: Current concepts and research. *J Am Dent Assoc.* 1997; 128 (suppl): 19S-25S.
- ◆ Haywood VB, Leonard RH, Dickenson GL. Efficacy of six-months nightguard vital bleaching of tetracycline-stained teeth. *J Esthet Dent.* 1997; 9(1): 13-19.
- ◆ Haywood VB. Nightguard vital bleaching of tetracycline stains teeth 54 months posttreatment. *J Esthet Dent.* 1999; 11(5): 265-277.
- ◆ Haywood VB, Caughman WF, Frazier KB, Myers ML. Tray delivery of potassium nitrate-fluoride to reduce bleaching sensitivity. *Quintessence Int.* 2001; 32: 105-109.
- ◆ Herrera LJ, Pomares H, Rojas I, Valenzuela O, Prieto A. TaSe, a Taylor Series Based Fuzzy System Model that Combines Interpretability and Accuracy. *Fuzzy Sets Syst.* 2005; 153:403-427.

- ◆ Herrera LJ. Sistemas Inteligentes Adaptativos para Aproximación y Predicción Utilizando Metodologías Avanzadas [Tesis]. Granada: Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Granada; 2007.
- ◆ Herrera LJ, Pomares H, Rojas I, Guillen A, Rubio G, Urquiza J. Global and Local Modelling in Radial Basis Functions Networks. In Joan Cabestany and Francisco Sandoval and Alberto Prieto and Juan M. Corchado, editors, IWANN (1) in Lecture Notes in Computer Science, pages 49-56, 2009. Springer.
- ◆ Herrmann CS. A Hybrid Fuzzy-Neural Expert System for Diagnosis. IJCAI; 1995; 494-501.
- ◆ Hita E. El mundo del color desde lo perceptivo y artístico a lo científico. (edición). Granada; Editorial de la Universidad de Granada; 2001.
- ◆ Ishikawa-Nagai S, Terui T, Ishibashi K, Weber HP, Ferguson M. Prediction of Optical Efficacy of Vital Tooth Bleaching Using Regression Analysis. Color Res Appl. 2004a; 5: 390-394.
- ◆ Ishikawa-Nagai S, Terui T, Ishibashi K, Weber HP, Ferguson M. Comparison of Effectiveness of two 10% Carbamide Peroxide Tooth-Bleaching Systems Using Spectrophotometric Measurements. J Esthet Restor Dent. 2004b; 16: 368-376.
- ◆ Johansen TA, Babuska R. Multiobjective Identification of Takagi-Sugeno Fuzzy Models. IEEE Trans Fuzz Syst. 2003; 11(6): 847-860.
- ◆ Joiner A. Tooth colour: a review of the literature. J Dent. 2004; 32 (Suppl 1): S3-S12.
- ◆ Joiner A. The bleaching of teeth: A review of the literature. J Dent. 2006; 34: 412-419.
- ◆ Joiner A, Hopkinson I, Deng Y, Westland S. A review of tooth colour and whiteness. J Dent. 2008a; 36: 2-7.
- ◆ Joiner A, Philpotts CJ, Alonso C, Ashcroft AT, Sygrove NJ. A novel optical approach to achieving tooth whitening. J Dent. 2008b; 36: 8-14.
- ◆ Jorgensen MG, Carroll WB. Incidence of tooth sensitivity after home whitening treatment. J Am Dent Assoc. 2002; 133: 1076-1082.
- ◆ Kang J, Min L, Luan Q, Li X, Liu J. Novel modified fuzzy c-means algorithm with applications. Digit Signal Process. 2009; 19: 309-319.

- ◆ Kaya AD, Turkun M. Reversal of dentin bonding to bleached teeth. *Oper Dent.* 2003; 28: 825-829.
- ◆ Kihn PW. Aclinical evaluation of 10 percent vs 15 percent carbamide peroxide tooth-whitening agents. *J Am Dent Assoc.* 1999; 131 (10): 1478-1484.
- ◆ Kuehni RG, Marcus RT. An experiment in visual scaling of small color differences. *Color Res Appl.* 1979; 4: 83-91.
- ◆ Kuehni RG. Hue uniformity and the CIELAB space and color difference formula. *Color Res Appl.* 1998; 23 (5): 314-322
- ◆ Kum KY, Lim KR, Lee CY, et al. Effects of removing residual peroxide and other oxygen radicals on the shear bond strength and failure modes at resin-tooth interface after tooth bleaching. *Am J Dent.* 2004; 17: 267-270.
- ◆ Lai SC, Tay FR, Cheung GS, et al. Reversal of compromised bonding in bleached enamel. *J Dent Res.* 2002; 81: 477-481.
- ◆ Leonard RH Jr, Haywood VB, Phillips C. Risk factors for developing tooth sensitivity and gingival irritation associated with nithguard vital bleaching. *Quintessence Int.* 1997; 28: 527-538.
- ◆ Leonard RH Jr, Bentley C, Eagle JC, Garland GE, Knight MC, Phillips C. Nithguard vital bleaching: A long-term study on efficacy, shade retention, side effects, and patients' perceptions. *J Esthet Restor Dent.* 2001; 13(6): 357-369.
- ◆ Leonard RH Jr, Smith LR, Garland GE, Caplan DJ. Desensitizing agent efficacy during whitening in an at-risk population. *J Esthet Restor Dent.* 2004; 16: 49-55.
- ◆ Lilliefors, H. "On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown". *J Am Stat Assoc.* 1967; 62: 399-402.
- ◆ Lindsey DT, Wee AG. Perceptibility and acceptability of CIELAB color differences in computer-simulated teeth. *J Dent.* 2007; 35: 593-599.
- ◆ Llamas Cadaval R, Villa Vigil AM. Biología de la pulpa y de los tejidos periapicales. En: Canalda Salí C y Brau Aguade E, editores. "Endodoncia. Técnicas clínicas y bases científicas". Barcelona: Editorial Masson SA; 2001. pp 4-13.

- ◆ Lu H, Lee YK, Villalta P, Powers JM, Garcia-Godoy F. Influence of the amount of UV component in daylight simulator on the color of dental composite resins. *J Prosthet Dent.* 2006; 96(5): 322-327.
- ◆ Luo MR, Cui G and Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formulae: CIEDE2000. *Color Res Appl.* 2001; 26: 340-50.
- ◆ Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I. "Evaluation of whiteness formulae for teeth", *Proceedings of 10th Congress of the International Color Association.* 2005: 839-842.
- ◆ Luo W, Westland S, Brunton P, Ellwood R, Pretty IA, Mohan M. Comparison of the ability of different colour indices to assess changes in tooth whiteness. *J Dent.* 2007; 35:109-116.
- ◆ Luo W, Westland S, Ellwood R, Pretty I, Choung U. Development of a whiteness index for dentistry. *J Dent.* 2009; 37(Suppl 1): e21-26.
- ◆ Martín del Brio B y Sanz A. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos.* 3^a Edición (Editorial Ra-ma) ISBN: 8478977430. ISBN-13: 9788478977437. (11/2006).
- ◆ Martínez Vázquez de Parga JA, Nieto Alcaide S, Romeo Rubio M, Cañada Madinazcoitia L. Factores que determinan la percepción del color en odontología. *Revista Internacional de Prótesis Estomatológica,* 2004; 6(3): 218-225.
- ◆ Matis BA, Cochran MA, Eckert G, Carlson TJ. The efficacy and safety of a 10% carbamide peroxide bleaching gel. *Quintessence Int.* 1998; 29: 555-563.
- ◆ Matis BA, Galao U, Blackman D, Schultz FA, Eckert GJ. In vivo degradation of bleaching gel used in whitening teeth. *J Am Dent Assoc.* 1999; 130: 227-235.
- ◆ Matis BA, Wang Y, Jiang T, Eckert GJ. Extended at-home bleaching of tetracycline-stained teeth with different concentrations of carbamide peroxide. *Quintessence Int.* 2002; 33(9): 645-655.
- ◆ Matis BA, Yousef M, Cochran MA, Eckert GJ. Degradation of bleaching gels in vivo as a function of tray design and carbamide peroxide concentration. *Oper Dent.* 2002; 27: 12-18.

- ◆ Matis BA, Wang Y, Eckert GJ, Cochran MA, Jiang T. Extended Bleaching of Tetracycline-Stained Teeth: A 5-Year Study. *Oper Dent.* 2006; 31(6): 643-651.
- ◆ Melo N, Gallego GJ, Restrepo LF, Peláez A. Blanqueamiento vital y métodos para la valoración de su eficacia y estabilidad. *Revista CES Odontología.* 2006; 19(2): 53-60.
- ◆ Menegaz G, Le Troter A, Sequeira J, Boi JM. A Discrete Model for Color Naming. *EURASIP J Adv Signal Process.* 2007: 1-10.
- ◆ Miguel LC, Baratieri LN, Monteiro S Jr, Ritter AV. In situ effect of 10% carbamide peroxide on resin-dentin bond strengths: A novel pilot study. *J Esthet Restor Dent.* 2004; 16: 235-241.
- ◆ Miller L. Organizing color in dentistry. *J Am Dent Assoc (Special Issue)* 1987; 26E-40E.
- ◆ Minoux M, Serfaty R. Vital teeth bleaching: Biologic adverse effects – A review. *Quintessence Int.* 2008 Aug; 39(8):645-659.
- ◆ Moody J, Darken C. Fast learning in networks of locally-tuned processing units. *Neural Comput.* 1989; 1(2): 281-294.
- ◆ Moreno E, Dávila I, Moreno V, Laffond E, Lorente F. Redes neuronales artificiales. Aplicación en la predicción de hipersensibilidad a antibióticos beta-lactámicos. Disponible en: <http://www.alergoaragon.org/2001/primeras.html>.
- ◆ O'Brien WJ, Hemmendinger H, Boenke KM, Linger JB, Groh CL. Color Distribution of three regions of extracted human teeth. *Dent Mater.* 1997; 13(3): 179-85.
- ◆ Odioso LI, Gibb RD, Gerlach RW. Impact of demographic, behavioral, and dental care utilization parameters on tooth color and personal satisfaction. *Compend Contin Educ Dent.* 2000; 21(Suppl 29): S35-S41.
- ◆ Ontiveros JC, Paravina RD. Color change of vital teeth exposed to bleaching performed with and without supplementary light. *J Dent.* 2009; 37: 840-847.
- ◆ Orr MJ. Local smoothing of RBF networks. *Internacional Symposium on Artificial Neural Networks,* 1995. Disponible en: <http://www.anc.ed.ac.uk/mjo/rbf.html>.

- ◆ Paravina RD. Evaluación de un nuevo aparato desarrollado para la determinación del color. *Revista Internacional de Prótesis Estomatológica. Edición Hispanoamericana*, 2003; 5(2): 138-144.
- ◆ Paravina RD, Powers JM. *Esthetic Color Training in Dentistry*. Houston, Texas: Elsevier Mosby; 2004.
- ◆ Paravina RD. New shade guide for tooth whitening monitoring: visual assessment. *J Prosthet Dent*. 2008; 99(3): 178-184.
- ◆ Pascual Moscardó A, Camps Alemany I. Aesthetic dentistry: Chromatic appreciation in the clinic and the laboratory. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2006; 11(4): E363-8.
- ◆ Peña-Reyes CA, Sipper M. Evolving fuzzy rules for breast cancer diagnosis. In: *Proceedings of 1998 International Symposium on Nonlinear Theory and Applications (NOLTA'98)*, Lausanne, 1998; 2: 369-372.
- ◆ Pérez MM. Determinación experimental de umbrales de discriminación cromática bajo distintos modos de presentación. Adecuación a recientes fórmulas de diferencia de color [Tesis]. Granada: Departamento de Óptica. Universidad de Granada; 1994.
- ◆ Pérez MM, Saleh A, Yebra A, Pulgar R. Study of the Variation between CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 Color-differences of Resin Composites. *Dent Mater*. 2007; 26(1): 21-28.
- ◆ Pohjola RM, Browning WD, Hackman ST, Myers ML, Downey MC. Sensitivity and tooth whitening agents. *J Esthet Restor Dent*. 2002; 14: 85-91.
- ◆ Pomares H, Rojas I, González J, Prieto A. Structure Identification in Complete Rule-Based Fuzzy Systems. *IEEE Trans Fuzz Syst*. 2002; 10(3): 349-359.
- ◆ Preston JD. Current status of shade selection and color matching. *Quintessence Int*. 1985; 16: 47-58.
- ◆ Pretty IA, Edgar WM, Higham SM. The effect of bleaching on enamel susceptibility to acid erosion and desmineralisation. *Br Dent J*. 2005; 198: 285-290.
- ◆ Ragain JC, Johnston WM. Color acceptance of direct dental; retoratives by human observers. *Color Res Appl*. 2000; 25: 278-285.

- ◆ Ragain JC, Johnston WM. Minimum color differences for discriminating mismatch between composite and tooth color. *J Esthet Restor Dent.* 2001; 13(1): 41-48.
- ◆ Rojas I, Pomares H, Ortega J, Prieto A. Self-organized fuzzy system generation from training examples. *IEEE Trans Fuzz Syst.* 2000; 8(1): 23-36.
- ◆ Ruyter IE, Nilner K, Moller B. Color stability of dental composite resin materials for crowns and bridge veneers. *Dent Mater.* 1987; 3: 246-51.
- ◆ Saleh A. Influencia de la fuente de fotoactivación, y del espesor sobre la variación del color y la translucidez de nuevos composites [Tesis]. Granada: Departamento de Óptica. Universidad de Granada; 2007.
- ◆ Schwabacher WB, Goodkind RJ. Three-dimensional color coordinates of natural teeth compared with three shade guides. *J Prosthet Dent.* 1990; 64(4): 425-431.
- ◆ Schwabacher WB, Goodkind RJ, Lua MJR. Interdependence of the hue, value, and chroma in the middle site of anterior human teeth. *J Prosthodont.* 1994; 3: 188-192.
- ◆ Seghi RR, Johnston WM, O'Brien WJ. Performance assessment of colorimetric devices on dental porcelains. *J Dent Res.* 1989; 68: 1755-1759.
- ◆ Segura Egea JJ, Jiménez Rubio-Manzanares A, Valle Rodríguez M. Fundamentos de colorimetría aplicados a la toma de color subjetiva en odontología. Quintessence (ed. esp.) 1999; 12(2): 75-83.
- ◆ Shimada K, Kakehashi Y, Matsumura H, Tanoue N. In vivo quantitative evaluation of tooth color with hand-held colorimeter and custom template. *J Prosthet Dent.* 2004; 91(4): 389-391.
- ◆ Silva AyÇaguer LC. Cultura estadística e investigación científica en el campo de la salud: una mirada crítica. Madrid: Díaz de Santos; 1997.
- ◆ Sim CP, Yap AU, Teo J. Color perception among different dental personnel. *Oper Dent.* 2001; 26: 435-439.
- ◆ Spalding M, Taveira LA, de Assis GF. Scanning electron microscopy study of dental enamel surface exposed to 35% hydrogen peroxide: Alone, with saliva, and with 10% carbamide peroxide. *J Esthet Restor Dent.* 2003; 15: 154-164.

- ◆ Sproull RC. Color matching in dentistry. 3. Color control. J Prosthet Dent. 1974; 31:146-154.
- ◆ Spyrides GM, Perdigao J, Pagani C, Araujo MA, Spyrides SM. Effect of whitening agents on dentin bonding. J Esthet Dent. 2000; 12: 264-270.
- ◆ Strackeljan J, Behr D, Kocher T. Fuzzy-pattern recognition for automatic detection of different teeth substances. Fuzzy Set Syst. 1997; 85: 275-286.
- ◆ Sulieman M. An overview of bleaching techniques: 2. Night Guard Vital Bleaching and non-vital bleaching. Dent Update. 2005; 32: 39-46.
- ◆ Takagi T y Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. IEEE Trans Syst Man Cybern. 1985; 15: 116-132.
- ◆ Teodorescu HL, Kandel A, Jain LC. Fuzzy Logic and Neuro-fuzzy Systems in Medicine and Bio-Medical Engineering: A Historical Perspective. In: Teodorescu HL, Kandel A, Jain LC. Fuzzy Logic and Neuro-fuzzy Systems in Medicine. London: CRC Press. 1999; 3-16.
- ◆ Titley KC, Torneck CD, Smith DC, Chernecky R, Adibfar A. Scanning electron microscopy observations on the penetration and structure of resin tags in bleached and unbleached bovine enamel. J Endod. 1991; 17: 72-75.
- ◆ Titley KC, Torneck CD, Ruse ND, Krmec D. Adhesion of a resin composite to bleached and unbleached human enamel. J Endod. 1993; 19: 112-115.
- ◆ Torneck CD, Titley KC, Smith DC, Adibfar A. The influence of time of hydrogen peroxide exposure on the adhesion of composite resin to bleached bovine enamel. J Endod. 1990; 16: 123-128.
- ◆ Torres A, Nieto JJ. Midpoints for Fuzzy Sets and their Application in Medicine. Artif Intell Med. 2003; 27: 81-101.
- ◆ Touati B, Miara P, Nathanson D. Odontología estética y restauraciones cerámicas. 1ª edición. Barcelona: Edit. Masson. SA. 2000.
- ◆ Trujillano J, March J, Sorribas A. Aproximación metodológica al uso de redes neuronales artificiales para la predicción de resultados en medicina. Med Clin (Barc). 2004; 122(Supl 1): 59-67.
- ◆ Trujillano Cabello J, Badía Castelló M, March Llanes J, Rodríguez Pozo Á, Serviá Goixart L, Sorribas Tello A. Redes neuronales artificiales en Medicina Intensiva. Ejemplo de aplicación con las variables del MPM II. Med Intensiva. 2005; 29(1): 13-20.

- ◆ Tung FF, Goldstein GR, Jang S, Hittelman E. The repeatability of in an intraoral dental colorimeter. *J Prosthet Dent.* 2002; 88: 585-590.
- ◆ Van der Burgt TP, Ten Bosch JJ, Borsboom PC, Kortsmid WJ. A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *J Prosthet Dent.* 1990; 63(2): 155-162.
- ◆ Van Noort R. Introduction to dental materials. 2^a edición. United Kingdom: Mosby; 2002.
- ◆ Wang LX. Adaptive fuzzy systems and control. Design and stability analysis. Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall, 1994.
- ◆ Waris G, Ahsan H. Reactive oxygen species: Role in the development of cancer and various chronic conditions. *J Carcinog.* 2006; 5: 14.
- ◆ Westland S. Review of the CIE System of Colorimetry and its use in dentistry. *J Esthet Restor Dent.* 2003; 15(Suppl1): S5-12.
- ◆ Wille T. A clinical pilot study of the time-dependent composition of tooth bleaching systems. *J Oral Rehab.* 2003; 30: 510-514.
- ◆ Wyszecki G. Color matching and color-difference matching. *J Opt Soc Am.* 1972; 62: 117-128.
- ◆ Yap AU, Sim CPC, Loh WL, Teo JH. Human-eye versus computerized color matching. *Oper Dent.* 1999; 24(6): 358-363.
- ◆ Yeh ST, Su Y, Lu YC, Lee SY. Surface changes and acid dissolution of enamel after carbamide peroxide bleach treatment. *Oper Dent.* 2005; 30: 507-515.
- ◆ Zadeh LA. Fuzzy Sets. *Inform Contr.* 1965; 8: 338-353.
- ◆ Zadeh LA. Biological application of the theory of Fuzzy Sets Syst. Proc. Int. Symp. Biocybernetics of the Central Nervous System. Boston: Little, Brown & Co. 1969; 199-212.
- ◆ Zalevsky Z, Gur E, Mendlovic D. Fuzzy-logic optical optimization of mainframe CPU and memory. *Appl Opt.* 2006; 45(19): 4647-4651.
- ◆ Zantner C, Derdilopoulou F, Martus P, Kielbassa AM. Randomized clinical trial on the efficacy of 2 over-the-counter whitening systems. *Quintessence Int.* 2006; 37(9): 695-706.
- ◆ Zhao Y, Zhu J. In vivo color measurement of 410 maxillary anterior teeth. *Chin J Dent Rest.* 1998; 1(3): 49-51.

Producción

Científica

A continuación, se citan las publicaciones científicas derivadas de los resultados obtenidos en este trabajo:

- ❖ Herrera LJ, Pulgar R, Santana J, Cardona JC, Guillén A, Rojas I, Pérez MM. Prediction of Color Change alter Tooth Bleaching using Fuzzy Logic for Vita Classical Shades Identification. Artículo aceptado para su publicación en Applied Optics, para aparecer en el número de Febrero de 2010, vol. 49 nº 4.

- ❖ J. Santana-Díaz, J. López-García, L.J. Herrera-Maldonado, M.M. Pérez-Gómez, R. Pulgar-Encinas. Prediction of color change after tooth bleaching using color CIELAB parameters and linear models. CONSEURO 2009, March 2009 Seville, Clinical Oral Investigations, vol. 13, no 1, pp. 97 (49-118).

- ❖ L.J. Herrera, M.M. Pérez, J. Santana, R. Pulgar, J. González, H. Pomares, I. Rojas. A Data Mining Approach Based on a Local-Global Fuzzy Modelling for Prediction of Color Change after Tooth Bleaching using Vita Classical Shades. 2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Desing and Applications, December 2009 Pisa, Italy, pp. 1268-1273.

- ❖ L.J. Herrera, H. Pomares, I. Rojas, J. Santana, R. Pulgar, R. Ghinea, M.M. Pérez. Sistemas Neuro-Difusos para el Modelado de la Evolución del Color. Modelado de un Proceso de Blanqueamiento Dental. ESTYLF'2010, del 3 al 5 de Febrero de 2010. Aceptado para su publicación.

