

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA, GEODESIA Y FOTOGRAMETRÍA



INTEGRACIÓN DE COLORIMETRÍA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DEL COLOR DEL SUELO Y SU INCLUSIÓN
EN UNA BASE DE DATOS ESPACIAL

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR PRESENTADA POR

ÁNGEL MARQUÉS MATEU

DIRIGIDA POR

Dr. JOSÉ L. BERNÉ VALERO
Dr. JUAN M. GISBERT BLANQUER

Esta tesis doctoral se presentó en Valencia el año 2013 coincidiendo con el primer centenario de la fundación de la *Commission Internationale de l'Éclairage*

“Science is nothing but trained and organised common sense”

T.H. Huxley

“It is better to be broadly right than precisely wrong”

J.M. Keynes

“The purpose of computing is insight, not numbers”

R.W. Hamming

RESUMEN

En esta tesis doctoral se describe un procedimiento para medir el color del suelo e incluir dicha información en una base de datos espacial. El procedimiento tiene en cuenta todos los aspectos relevantes del proceso de asignación de color a las muestras de suelo procesadas y está adaptado específicamente al flujo de trabajo típico del laboratorio de suelos. La tesis se estructura en cinco capítulos y dos apéndices tal y como se indica a continuación.

El Capítulo 1 contiene una introducción al concepto de Color. En primer lugar se justifica la importancia del color en una amplia variedad de disciplinas, prestando especial atención a los campos técnicos y científicos. A continuación se describe el sistema de visión humana y la gran influencia que dicho sistema tiene en los modelos y mecanismos ideados por el ser humano para entender y procesar numéricamente el color. En este contexto se introducen los denominados sistemas de ordenación de color, elementos básicos en muchas aplicaciones prácticas. Finalmente se presenta un tema fundamental en este trabajo como es el color del suelo, comenzando con la introducción del propio concepto de suelo y la trascendencia que supone el conocimiento del color en su estudio. Seguidamente se indican los sistemas de comunicación del color utilizados en la Ciencia del Suelo y sus relaciones con el desarrollo de la Ciencia del Color. El capítulo finaliza con un repaso a la metodología clásica para medir y comunicar el color del suelo.

El Capítulo 2 trata sobre Colorimetría, la ciencia de la medida del color. El capítulo se divide en tres partes diferenciadas. La primera contiene un resumen de unidades y magnitudes de uso habitual en Colorimetría. La segunda parte está dedicada a los espacios de color CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), fundamentales en el tratamiento numérico del color. La tercera parte contiene información sobre la instrumentación de medición de color, con un énfasis muy marcado en los colorímetros tricromáticos. Este capítulo sirve además como introducción o referencia para el usuario del laboratorio de suelos interesado en la medida precisa del color.

El Capítulo 3 está dedicado a las Bases de Datos Espaciales (BDE), las cuales constituyen el marco idóneo para el almacenamiento y tratamiento de la información espacial.

Se dedica una sección a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que son la herramienta elegida en esta tesis para el almacenamiento de la información del color del suelo. A continuación se especifican los distintos tipos de datos espaciales necesarios para implementar una BDE que contemple todos los aspectos importantes desde el punto de vista agronómico. El capítulo se completa con dos secciones dedicadas a los formatos de datos y a los metadatos, aspecto éste último cada vez más importante en el campo de las tecnologías de la información espacial.

El Capítulo 4 presenta el procedimiento propuesto y constituye la aportación más importante de la tesis. En primer lugar se justifica la propuesta de un procedimiento en el contexto de las técnicas clásicas de medición del color del suelo, analizando los puntos débiles de dichas técnicas con el objetivo de reducir su impacto en las mediciones de color. A continuación se describe detalladamente el equipo de laboratorio necesario para poder seguir el procedimiento. Se presenta un método de transformación entre espacios de color basado en técnicas de aprendizaje automático junto con una aplicación informática. Estos dos últimos puntos son originales y se han desarrollado basándose en la experiencia de los usuarios del laboratorio de suelos. El capítulo acaba con un resumen que engloba todos los pasos individuales descritos en los apartados anteriores.

El Capítulo 5 contiene las conclusiones y reflexiones extraídas a lo largo del desarrollo de la presente tesis. Asimismo se proponen posibles líneas de trabajo futuras, que podrán ampliar las capacidades del procedimiento propuesto mediante el uso de nuevos sensores o modelos de color avanzados.

El Apéndice A contiene detalles de la programación realizada durante el desarrollo de esta tesis. En particular se describen los dos programas más importantes en este trabajo. El primero de ellos se encarga de controlar la instrumentación de lectura de color, de la recolección de datos y de su almacenamiento en ficheros de disco. El segundo programa descrito realiza la conversión entre espacios de color mediante un enfoque novedoso basado en un método de clasificación de patrones típico de las aplicaciones de aprendizaje automático. El apéndice se completa con algunos fragmentos de código que muestran el uso de librerías especializadas para la creación de ficheros de datos en

distintos formatos de datos espaciales.

El Apéndice B concluye esta tesis doctoral y contiene una de las aplicaciones prácticas que se pueden llevar a cabo haciendo uso de los datos obtenidos con el procedimiento propuesto. En esta aplicación se obtienen relaciones estadísticas entre el color del suelo y una serie de factores formadores y características edáficas del suelo que contribuyen al conocimiento del elemento suelo en aspectos como la gestión o la conservación.

PALABRAS CLAVE: Sistemas de Información Geográfica, Ciencia del Suelo, Bases de Datos Espaciales, Colorimetría

SUMMARY

This thesis describes a procedure for measuring soil colour and loading colour information into a spatial database. The procedure takes into account all the major issues of the process of assigning colour to soil samples and is specifically adapted to typical laboratory workflows. This thesis is divided in five chapters and two appendices as described below.

Chapter one includes an introduction to the general subject of colour. First, the importance of colour in several disciplines is explained, with emphasis on technical and scientific fields. Next, the human visual system is described. We particularly highlight the influence that our visual system has on physical models and mechanisms invented to understand, as well as to numerically process colour. Colour order systems are introduced in this context. Finally, the subject of soil colour is presented in detail. We first give an introduction to the concept of soil from the agricultural standpoint and describe the significance that colour has in soil studies. Colour spaces and colour order systems used in soil science are conveniently outlined. The chapter ends with a review of the classical methodology used to measure and communicate soil colour.

Chapter two is concerned with Colorimetry, the science of Colour measurement. There are three different parts in the chapter. The first part contains a summary of physical units and magnitudes used in Colorimetry. The second part concentrates on CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) colour spaces, which are essential elements to numerically process colour data. The third part deals with instrumentation, specifically with the trichromatic colorimeter, which was the one used in this thesis. This chapter was written with laboratory users in mind. It is, therefore, both an introduction to the newcomer and a reference to experienced users interested in precise soil colour measurements.

Chapter three, "Spatial databases", defines a suitable framework for storing and processing spatial information. There is a major section on geographical information systems (GIS), which is the specific tool used to manage all the relevant information related to soil colour. Next, we cover the different spatial datasets that can be required to build a spatial

database suitable for agricultural applications. The chapter concludes with two sections on data formats and metadata, which nowadays are becoming more important in the field of spatial information technologies.

This thesis suggests a working procedure that is described in Chapter four. The reader can find major contributions here. The proposed procedure is accounted for in the context of classical soil colour measurement techniques, determining their weaknesses with the purpose of reducing their impact on colour measurements. We describe in detail the laboratory equipment and setup needed. In addition, we propose a colour transformation method based on automatic learning techniques, together with a computer program. The development of these two items was based on laboratory experience. The last section contains a summary of the whole procedure within a step-by-step description.

Chapter five contains conclusions of the research and a discussion of the proposed procedure. It also contains future lines of research derived from the procedure proposed in the thesis. These include the use of new sensors and advanced colour models.

Appendix A provides programming and implementation details on several programs that were written as part of this thesis. The two most important programs are described. The objective of the first program is twofold. Firstly, it controls the measurement operations of the colorimeter over a serial line. Secondly, it stores and organises colour data on disk files. The second program performs the conversion between colour spaces with a novel approach based on a classification method used in machine learning and data mining applications. This appendix contains several code snippets which show the use of specialised libraries to create data files in different spatial data formats.

Appendix B concludes this thesis and presents a practical application that were carried out using data collected with our procedure. In this study, we found a number of statistical relationships between soil colour and several forming factors and soil characteristics that contribute to soil management and conservation.

KEYWORDS: geographical information systems, spatial databases, soil science, colorimetry

RESUM

En aquesta tesi doctoral es descriu un procediment per a mesurar el color del sòl i incloure aquesta informació en una base de dades espacials. El procediment considera tots els aspectes rellevants del procès d'assignació de color a les mostres de sòl processades i està adaptat específicament al flux de treball típic del laboratori de sòls. La tesi s'estructura en cinc capítols i dos apèndixs tal i com s'indica a continuació.

El Capítol 1 contè una introducció al concepte de Color. En primer lloc, es justifica la importància del color en una àmplia varietat de disciplines, especialment en els camps tècnics i científics. A continuació es descriu el sistema de visió humana i la gran influència que aquest sistema té sobre els models i mecanismes ideats per l'ésser humà per a entendre i processar numèricament el color. En aquest context s'introdueixen els sistemes d'ordenació del color, elements bàsics en moltes aplicacions pràctiques. Finalment, es presenta un tema fonamental en aquest treball com és el color del sòl, començant amb la introducció del concepte de sòl i la transcendència que suposa el coneixement del color en el seu estudi. Seguidament, s'indiquen els sistemes de comunicació del color emprats en la Ciència del Sòl i les seues relacions amb el desenvolupament de la Ciència del Color. El capítol es tanca amb un repàs a la metodologia clàssica per a medir i comunicar el color del sòl.

El Capítol 2 tracta sobre Colorimetria, la ciència de la mesura del color. El capítol es divideix en tres parts diferenciades. La primera contè un resum d'unitats i magnituds d'ús habitual en Colorimetria. La segona part està dedicada als espais de color CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), fonamentals en el tractament numèric del color. La tercera part contè informació sobre la instrumentació utilitzada en la mesura del color, amb un èmfasi molt marcat en els colorímetres tricromàtics. Aquest capítol serveix a més com introducció o referència per a l'usuari del laboratori de sòls interessat en la mesura precisa del color.

El Capítol 3 està dedicat a les Bases de Dades Espacials (BDE), les quals constitueixen el marc idoni per a l'emmagatzematge i tractament de la informació espacial. Hi ha una secció dedicada als Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) que són la ferramenta

escollida en aquesta tesi per a gestionar la informació del color del sòl. A continuació, s'especifiquen els diferents tipus de dades espacials necessàries per a implementar una BDE que contemple tots els aspectes importants des d'el punt de vista agronòmic. El capítol es tanca amb dues seccions dedicades als formats de dades i a les metadades, essent aquest últim aspecte cada vegada més important en el camp de les tecnologies de la informació espacial.

El Capítol 4 presenta el procediment proposat i constitueix l'aportació més important de la tesi. En primer lloc es justifica la proposta d'un procediment en el context de les tècniques clàssiques de medició del color del sòl, analitzant els punts febles d'eixes tècniques amb l'objectiu de reduir el seu impacte en les mesures de color. A continuació es descriu detalladament l'equip de laboratori necessari per a poder seguir el procediment. Es presenta un mètode de transformació entre espais de color basat en tècniques d'aprenentatge automàtic junt amb una aplicació informàtica. Aquests dos últims punts són originals i s'han desenvolupat a partir de l'experiència dels usuaris del laboratori de sòls. El capítol acaba amb un resum que inclou tots els passos individuals descrits en els apartats anteriors.

El Capítol 5 contè les conclusions i reflexions extretes al llarg del desenvolupament de la present tesi. També es proposen possibles línies d'investigació futures, que podran ampliar les capacitats del procediment proposat mitjançant l'ús de nous sensors o models de color avançats.

L'Apèndix A contè detalls de la programació realitzada com a part d'aquesta tesi. En particular es descriuen els dos programes més importants en aquest treball. El primer s'encarrega de controlar la instrumentació de lectura de color, de la recolecció de dades i del seu emmagatzematge en fitxers de disc. El segon programa descrit fa la conversió entre espais de color mitjançant un enfocament nou basat en un mètode de classificació de patrons típic de les aplicacions d'aprenentatge automàtic. L'appendix es completa amb alguns fragments de codi que mostren l'ús de biblioteques especialitzades per a la creació de fitxers en diferents formats de dades espacials.

L'Apèndix B conclou aquesta tesi doctoral i contè una de les aplicacions pràctiques

que es poden dur a terme fent ús de les dades obtingudes amb el procediment proposat. En aquesta aplicació s'obtenen relacions estadístiques entre el color del sòl i una serie de factors formadors i característiques del sòl que contribueixen al coneixement de l'element sòl en aspectes com la seua gestió o la seua conservació.

PARAULES CLAU: Sistemes d'Informació Geogràfica, Bases de Dades Espacials, Ciència del Sòl, Colorimetria

Agradecimientos

A lo largo del periodo de realización de esta tesis he recibido apoyo de muchas personas a quienes quiero mostrar mi gratitud.

A mis directores Dr. José L. Berné y Dr. Juan M. Gisbert por sus valiosos consejos que me ayudaron a ir progresando poco a poco hasta el final.

A Laura Hernández, jefa de administración del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, por guiarme con absoluta precisión por la larga y tortuosa ruta administrativa.

Al Dr. Mariano Aguilar, sin cuya ayuda nunca hubiera podido realizar esta tesis, por enseñarme a medir el color y también por regalarme un círculo de Maxwell que guardo con cariño en mi colección de artilugios curiosos.

A mi amiga Gema Andrés de TRAGSATEC con quien comencé a trabajar en el campo de la Cartografía de Suelos.

A mi amigo Dr. Gerardo Urios de Land Studios, con quien he compartido trabajos de campo y de gabinete, así como una fascinación por la tecnología SIG.

A mis compañeros del Laboratorio de Suelos y del CVER: Dra. Sara Ibáñez, Héctor Moreno y Javi Roig, con quienes nunca dejo de aprender sobre Edafología y Agricultura.

Al Dr. Ignacio Maestro, mi compañero de cordada en la montaña.

A mis amigas y compañeras de promoción María del Mar Rubio y Laura Cabezado del ICV por compartir conmigo su experiencia.

A mis profesores de Matemáticas Dra. Pepa Marín y Dr. Emilio Checa, quienes sabrán ver en algunas partes de este trabajo parte de sus enseñanzas.

Al Dr. Manuel Chueca, quien fue mi profesor en la Escuela de Topografía de la UPV y en cuyos libros leí por primera vez el término Geomática, lo cual me ha llevado finalmente a escribir este trabajo.

A mis compañeros del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría Jose M. Paredes, Chus Jiménez y Nieves Quesada.

A mi compañera Miriam Villar de la Fundación Giménez Lorente de la UPV por su ayuda con las imágenes.

A mis compañeros Dr. José Luis Lerma y Gabi Riutort del GIFLE con quienes he trabajado en la caracterización de sensores digitales.

A la Dra. Amparo Soriano y al Dr. Eladi de Miquel de la antigua EU de Ingenieros Técnicos Agrícolas, dos profesores únicos e inimitables.

Al Dr. Sebastià Balasch del Departamento de Estadística e Investigación Operativa por su ayuda con el análisis de coincidencia de atributos.

A mis antiguos compañeros de la Unidad Docente de Topografía de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Dr. José Herráez, Dr. José L. Denia e Ignacio Cruzado.

A mis antiguos compañeros del *Ajuntament de Benicàssim* Ximo Izquierdo, Pep Forés, Eva Matutano, Angelines Aldea, Luis Benito y Miguel Álvarez, con quienes pasé tres años enriquecedores e inolvidables.

A José Manuel Canales (Alban) y Ros Fombuena por los momentos inolvidables que hemos vivido juntos y por la ayuda que me habéis prestado en momentos muy concretos.

Finalmente quiero dar las gracias a quienes verdaderamente ayudan a resolver las cosas importantes: mi FAMILIA. Mati Balaguer, Eloi Marqués, Víctor Marqués y todos los demás (incluyendo a mi sobrino Guillem, el último en llegar), a quienes espero poder devolver el tiempo robado.

A todos vosotros: ¡¡Muchísimas gracias!!

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	1
1.2	La importancia del color	2
1.3	Visión del color	10
1.4	Sistemas de ordenación de color	36
1.5	El color del suelo	50
2	Colorimetría	67
2.1	Unidades, magnitudes y terminología	67
2.2	Colorimetría y espacios de color CIE	75
2.3	Instrumentación	105
3	Bases de Datos Espaciales	119
3.1	Introducción	119
3.2	Sistemas de Información Geográfica	122
3.3	Datos espaciales	125
3.4	Formatos de datos espaciales	135
3.5	Metadatos	143
4	Procedimiento de laboratorio	147
4.1	Introducción	147
4.2	Limitaciones del uso de tablas de color del suelo	150
4.3	Equipo de laboratorio	164

4.4	Transformación entre espacios de color	169
4.5	Desarrollo de la aplicación informática	177
4.6	Procedimiento propuesto	179
5	Conclusiones	185
5.1	Perspectivas futuras	188
	Bibliografía	193
A	Programación	207
A.1	Programa CS100A	207
A.2	Programa snn	211
A.3	Formatos de datos espaciales	213
B	Aplicación	217

Lista de Figuras

1.1	Espectro electromagnético	4
1.2	Escalas de color mixtas recomendadas por la EEA	9
1.3	Modelo de visión Cartesiana	11
1.4	Modelo de combinación de señales LMS en la teoría oponente	13
1.5	Anatomía del ojo humano	15
1.6	Estructura de la retina	16
1.7	Densidad de fotorreceptores	18
1.8	Mosaico formado por los fotorreceptores	19
1.9	Espectros de absorción de conos y bastones	19
1.10	Simulación del procesamiento de imágenes captadas por una serpiente	23
1.11	Estructura del ojo de <i>G. smithii</i>	24
1.12	Ruta visual	26
1.13	Estructura del núcleo geniculado lateral	27
1.14	Curvas de visibilidad fotópica y escotópica	32
1.15	Círculo cromático de Newton	38
1.16	Círculo cromático de Goethe	38
1.17	Esfera cromática de Runge	39
1.18	Círculo cromático de Ostwald	42
1.19	Sólido de color de Ostwald	42
1.20	Círculo de color de Munsell	45
1.21	Sólido de color de Munsell	45

1.22	Hoja YR-R del libro Munsell de 1929	47
1.23	Notación Munsell y su correspondencia numérica	48
1.24	Triángulo de texturas (USDA)	53
1.25	Triángulo de color de Zakharov	58
1.26	Tabla Munsell de suelos: denominación de colores	62
1.27	Tabla Munsell de suelos: fichas de color	63
2.1	Esquema de un colorímetro con campo visual bipartito	77
2.2	Diagrama de cromaticidad rg	80
2.3	Funciones de igualación de color en los espacios RGB y XYZ	84
2.4	Primarios X Y Z sobre el diagrama de cromaticidad rg	87
2.5	Diagrama de cromaticidad xy	92
2.6	Longitud de onda dominante y pureza p_e	94
2.7	Elipses de MacAdam	96
2.8	Elipses de MacAdam proyectadas sobre el plano XZ	97
2.9	Diagrama de cromaticidad uniforme	97
2.10	Espacio CIELAB	100
2.11	Fotómetro de color (1887)	107
2.12	Aparato de discriminación cromática de MacAdam (1942)	107
2.13	Colorímetro Duboscq	109
2.14	Esquema del colorímetro triestímulo	112
2.15	Geometría $45^\circ/0^\circ$ direccional	112
2.16	Diagrama de componentes del colorímetro CS-100A	115
2.17	Esquema electrónico del colorímetro CS-100A	115
3.1	Mapa de puntos de muestreo sobre mapa litológico (Sax)	129
3.2	Recolección de muestras de suelo en campo con barrena	131
3.3	Desplazamiento debido a la especificación del datum	133
4.1	Determinación del color del suelo con tablas Munsell	148
4.2	Deterioro de la tablas de color	149

4.3	Efecto del tamaño de partícula en la luminancia	155
4.4	Muestra preparada para las medidas de color	155
4.5	Componentes de la interacción entre luz y materia	156
4.6	Componentes del equipo de laboratorio	167
4.7	Muestra de suelo observada a través del colorímetro	173
4.8	Representación gráfica del método de clasificación kNN	174
4.9	Observación de las tablas Munsell a través del colorímetro	176
4.10	Interfaz del programa de recolección de datos	178
4.11	Diagrama de flujo del procedimiento propuesto	181
5.1	Programa de aplicación para la caracterización de dispositivos digitales .	191
A.1	Diagrama de flujo de la orden “Export” del programa CS-100A	209

Lista de Tablas

1.1	Designación de horizontes	54
1.2	Equivalencia entre notaciones Munsell y la representación numérica en el índice B-W	65
2.1	Magnitudes de base y unidades básicas en Colorimetría	69
2.2	Magnitudes y unidades derivadas en Colorimetría	69
2.3	Magnitudes y unidades auxiliares en Colorimetría	69
2.4	Equivalencia entre unidades SI y unidades antiguas	69
2.5	Atributos de color en los espacios Munsell, Yxy y CIELAB	74
2.6	Coordenadas <i>rgb</i> de los primarios \mathcal{X} \mathcal{Y} \mathcal{Z}	88
2.7	Comandos del colorímetro CS-100A	117
3.1	Operaciones SIG Universales	124
3.2	Grupos de trabajo del ISO/TC 211	126
3.3	Datos espaciales de interés en Agronomía	128
3.4	Definiciones de INSPIRE	130
3.5	Sistemas de referencia INSPIRE	134
3.6	Sistemas de referencia	135
3.7	Ficheros del formato Shapefile	141
3.8	Grupos de metadatos	144
4.1	Medidas de color con diferente tamaño de partícula	153
4.2	Agrupaciones de patrones del análisis de atributos	161

4.3	Patrones 5YR (5YR5/3, 5YR6/3)	162
4.4	Patrones 7.5YR (7.5YR5/3, 7.5YR6/4, 7.5YR7/4)	162
4.5	Patrones 10YR6/3, 2.5Y6/3	162
4.6	Coherencia (%) dentro de cada evaluador y entre evaluadores	163
4.7	Porcentaje de coincidencia (%) con el patrón dentro de cada evaluador y conjunta para todos los evaluadores	164
A.1	Botones del programa CS-100A	208
A.2	Ejemplo de tabla de coordenadas	211
A.3	Ejemplo de tabla de datos de color	211

Capítulo 1

Introducción

1.1 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es proponer un procedimiento de laboratorio para medir el color del suelo y almacenar esta información en una base de datos espacial. Para alcanzar el objetivo general se definen unos objetivos específicos reseñados a continuación:

- Identificar las limitaciones del método clásico de asignación de color mediante tablas Munsell. Algunos factores como la luz ambiental o la experiencia del observador intervienen en los resultados de las asignaciones de color mediante el método clásico. Sin embargo, no existen estudios sistemáticos que cuantifiquen los efectos de estos factores sobre las notaciones de color. Por tanto ha sido necesario valorar las limitaciones del método clásico.
- Arbitrar un mecanismo que permita el uso conjunto de espacios de color CIE y del sistema de ordenación de color Munsell usado en la práctica de la Ciencia del Suelo. Este objetivo requiere la combinación de dos disciplinas, la Colorimetría y la Ciencia del Suelo, aparentemente alejadas, pero con un fin común que en el caso particular de esta tesis es la medición del color.
- Proponer un método de conversión entre espacios de color que, por una parte, permita su integración en el flujo de trabajo típico del Laboratorio de Suelos, y por otra se adapte al método de asignación clásico mediante comparación visual de muestras y fichas de color Munsell.

- Definir una configuración de laboratorio específica para la medición del color de las muestras de suelo. Esta configuración debe tener en cuenta todos los aspectos instrumentales y de procesamiento de datos necesarios en cada etapa del procedimiento.
- Desarrollar una aplicación informática que permita manipular la instrumentación específica de lectura de datos de color y que sea capaz de combinar dicha información con información geográfica para la generación de conjuntos de datos espaciales.
- Establecer un marco de trabajo donde el usuario de la información del suelo pueda procesar, según sus necesidades, la información georreferenciada del color del suelo en combinación con otros conjuntos de datos de interés agronómico espacialmente distribuidos. Se propone la utilización de Sistemas de Información Geográfica.

1.2 La importancia del color

El color es un estímulo primordial para la experiencia humana. Se cree que el sentido de la vista proporciona el 80% de la información que obtenemos de nuestro entorno (Ohta and Robertson, 2005) y que el 25% del cerebro está de alguna manera relacionado con él (Society for Neuroscience, 2008). La visión en color constituye un elemento esencial en el procesamiento de la información visual, permitiendo distinguir y separar objetos que no podrían ser detectados con sistemas de visión monocromática.

El estudio del color se ha planteado desde diversas áreas con enfoques y objetivos específicos. Las disciplinas que han prestado mayor atención al estudio de la naturaleza del color son la Física, la Medicina y la Psicología. La existencia de estos tres campos de estudio está en estrecha relación con las tres “etapas” del proceso de visión.

Efectivamente, la sensación de color experimentada por un observador tiene su origen en la energía luminosa procedente de un determinado objeto o fuente de luz. Una parte de la radiación es captada por el ojo, donde se encuentran los fotorreceptores encargados de

transformar la energía luminosa en energía eléctrica. Finalmente los impulsos eléctricos generados al captar la energía son interpretados por el cerebro.

La energía luminosa es una forma de energía radiante cuyas características se estudian en el ámbito de la Física, siendo particularmente importante en Radiometría, Fotometría y Espectrofotometría. El estudio de la energía luminosa proporciona la composición espectral de la luz y permite transformar los espectros en coordenadas cartesianas. El uso de coordenadas permite tratar el color de forma cuantitativa (Capítulo 2).

La frecuencia es la única característica física constante de la radiación luminosa y representa la naturaleza ondulatoria de la luz en términos de ciclos por unidad de tiempo. Sin embargo, el proceso de recepción de energía en el ojo o en cualquier otro sensor se puede explicar también en términos corpusculares en función de los cuantos de energía que impactan contra la superficie receptora. Los cuantos de energía luminosa se denominan fotones. La longitud de onda (λ) de una señal que viaja a velocidad v se define como:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

donde f es la frecuencia y v depende del medio de propagación. La longitud de onda se mide en unidades de longitud y en el caso particular de las ondas del espectro visible se utiliza el nanómetro o nm.

La energía luminosa es el estímulo desencadenante del proceso visual al producir un efecto fotoquímico en la retina (Aguilar y Blanca, 1995). Esta forma de energía ocupa una pequeña porción del espectro electromagnético entre las longitudes de onda de 380 nm y 780 nm aproximadamente. En el marco de este rango electromagnético, se denominan longitudes de onda largas, medias y cortas a aquellas que producen estímulos de color rojo, verde y azul respectivamente (Figura 1.1).

La visión del color es objeto de estudio en varias ramas de la Medicina, principalmente Anatomía, Fisiología y Neurología. La comprensión del fenómeno de la visión del color requiere en primer lugar conocer cuantos tipos de fotorreceptor existen en la retina. También es necesario conocer las reacciones químicas que tienen lugar en el sistema ocular. Finalmente, es necesario conocer el recorrido neuronal de los impulsos eléctricos

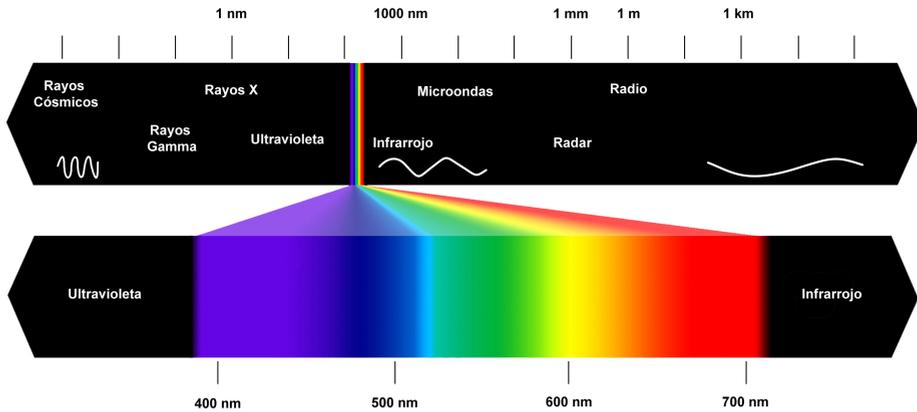


Figura 1.1: Espectro electromagnético

en el cerebro.

La Psicología proporciona una perspectiva adicional. Puesto que el color también es una sensación, es posible estudiarlo como una de las bases de la percepción en el marco de los sentidos del ser humano. El estudio del color, al igual que otros tipos de estímulo, se basa en el uso de métodos psicofísicos (Guirao, 1980). Estos métodos tienen como objetivo obtener la relación entre las propiedades físicas de un estímulo o entrada y la percepción psicológica de dicho estímulo o salida. En el caso del color, la entrada consiste en energía luminosa, cuya medición se lleva a cabo con instrumentación óptica adecuada (Sección 2.3). La salida o correlato psicofísico es más difícil de medir puesto que se trata de una respuesta subjetiva.

El color también ha estado en la base de varios estudios culturales y lingüísticos. Berlin y Kay (1969) publicaron el primer estudio sistemático sobre la influencia de los colores en los ámbitos culturales y lingüísticos. Según este estudio existe un conjunto de 11 colores extendidos universalmente en todo el mundo, que los autores denominaron *categorías de color básicas*. Las 11 categorías de color son blanco, negro, rojo, verde, amarillo, azul, marrón, púrpura, rosa, naranja y gris.

El análisis de los datos permitió ordenar las categorías anteriores según la siguiente

secuencia:

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Blanco} \\ \textit{Negro} \end{array} \right] < \left[\textit{Rojo} \right] < \left[\begin{array}{c} \textit{Verde} \\ \textit{Amarillo} \end{array} \right] < \left[\textit{Azul} \right] < \left[\textit{Marrón} \right] < \left[\begin{array}{c} \textit{Púrpura} \\ \textit{Rosa} \\ \textit{Naranja} \\ \textit{Gris} \end{array} \right]$$

La expresión $a < b$ relaciona dos categorías de color a , b de manera que si el color b está presente en una determinada lengua, también lo estará el color a . Por ejemplo, si una lengua contiene un término para el azul, entonces obligatoriamente contendrá términos para el blanco, negro, rojo, verde y amarillo, pero no necesariamente para el resto de colores.

La serie anterior se puede interpretar además desde el punto de vista evolutivo, de modo que cada clase corresponda a una etapa. La categoría inicial caracteriza a las lenguas denominadas sistemas de tipo I y se corresponde con la clase $[\textit{Blanco}, \textit{Negro}]$. Esta clase existe en todos los idiomas. El hecho de tener únicamente dos categorías de color no significa que no se reconozcan otros colores. Por ejemplo los hablantes de la lengua Dani de Nueva Guinea, usan sólo dos términos básicos de color. Uno de estos términos incluye el negro, azul, verde y los colores oscuros, mientras que el segundo identifica el blanco, amarillo, naranja, rojo y los colores claros (Witkowski and Brown, 1978).

La clase $[\textit{Verde}, \textit{Amarillo}]$ contiene en realidad dos etapas, de modo que hay dos posibles rutas antes de adquirir la clase $[\textit{Azul}]$:

$$[\textit{Rojo}] \Rightarrow [\textit{Verde}] \Rightarrow [\textit{Amarillo}] \Rightarrow [\textit{Azul}]$$

o bien

$$[\textit{Rojo}] \Rightarrow [\textit{Amarillo}] \Rightarrow [\textit{Verde}] \Rightarrow [\textit{Azul}]$$

En opinión de los autores, la existencia de categorías universales contradice la teoría de la Relatividad Lingüística o teoría de Sapir-Whorf, según la cual un idioma codifica la

experiencia de sus hablantes de manera única y diferente a otros idiomas, o dicho de otro modo, el lenguaje tiene influencia sobre el pensamiento de una determinada sociedad.

La interpretación propuesta por Berlin y Kay en 1969 no está aceptada de manera generalizada. Saunders (2000) sostiene que el estudio de Berlin y Kay contiene algunos errores de diseño y de tipo cultural que hacen que el carácter universal propuesto por los autores no sea correcto. Por ejemplo la lengua Hanunoo, hablada en Filipinas, no contiene ninguna palabra que signifique color. Los hablantes de esta lengua utilizan cuatro términos de color: claro, oscuro, fresco y seco. Los términos claro y oscuro se puede asociar de manera bastante clara a la categoría blanco y negro. Sin embargo, los vocablos fresco y seco (reminiscencia del Castellano) no tienen interpretación clara. Algunos autores los han relacionado con la textura, mientras que otros los han relacionado con la designación de los colores verde y rojo, haciendo difícil su inclusión en el esquema de Berlin y Kay (Ball, 2009).

En cualquier caso, el trabajo de Berlin y Kay ha tenido gran influencia desde su aparición y se ha extendido al campo de la Lingüística Antropológica donde se ha utilizado el número de categorías básicas de color como indicador de la complejidad las sociedades. Tal y como se ha comentado anteriormente, algunas lenguas únicamente tienen términos para distinguir entre el blanco y negro (sistemas de tipo I). A medida que la sociedad se vuelve más compleja el número de términos aumenta, añadiendo secuencias de términos para el rojo, verde, amarillo, azul y el resto de categorías. Desde la perspectiva de la Antropología, este conjunto de términos está relacionado con el control tecnológico de tintes y pinturas de cada sociedad (Harris, 1983).

Precisamente la obtención de tintes y pinturas está en estrecha relación con otra perspectiva del color procedente del mundo del Arte. La obtención de nuevos pigmentos tuvo gran importancia en el desarrollo de las corrientes pictóricas más importantes de la historia. Algunos autores necesitaban inventar nuevos colores, lo cual abrió nuevas vías para obtener las materias primas con las que fabricar esos nuevos colores que no podían ser representados por pigmentos naturales (Ball, 2009).

El uso de estos pigmentos naturales en pinturas rupestres se remonta al paleolítico

superior (30000-10000 años antes de la época presente) o quizá antes si se confirman los últimos análisis de datación de las pinturas de la cueva de Nerja (Málaga). En el antiguo Egipto (hacia 1290 a.C.) se logró la síntesis del pigmento azul egipcio, utilizado en el barnizado de la loza fina egipcia. Se cree que esta técnica estimuló otros avances tecnológicos como la producción de vidrio o la fusión del cobre a gran escala.

La pintura con sombreados de maestros como Cennino (técnica completamente nueva hacia 1365) introdujo nuevas técnicas de manejo de los colores. Se utilizaban colores más saturados en las zonas sombreadas, mientras que en las zonas iluminadas se utilizaban pigmentos más claros. Esto obligó a procesar los pigmentos en gradaciones para sus distintos usos sobre el lienzo.

En tiempos más recientes algunos autores han manifestado una especie de fascinación por el color. Vasili Kandinsky reflexionaba en 1931 sobre la paleta de colores disponible en la época y admitía que la propia paleta de colores podía ser considerada como una obra de arte en sí misma. Yves Klein llegó un poco más allá en 1954 y declaró que en el futuro los cuadros serían de un solo color.

Sin embargo la pintura en color no siempre tuvo aceptación. En el siglo I, Plinio el Viejo en su libro 35 titulado “Mineralogía, usos de la tierra, pigmentos, discusión sobre el arte de la pintura y el uso del sulfuro” se pronunciaba en contra de los nuevos colores que venían de Oriente. Asimismo, en la Florencia del siglo XV se prestó mayor importancia al dibujo (*disegno*) que a la pintura en color. En 1920, Le Corbusier le daba toda la importancia a la forma, criticando incluso la utilización del color por parte de pintores como Cézanne.

El interés del artista por los colores se extiende hasta tiempos modernos. Algunos ejemplos típicos son los materiales usados en los cuadros impresionistas o el *International Klein Blue* o IKB de Yves Klein.

En el caso de los impresionistas la paleta básica de colores estaba compuesta por blanco de cinc, blanco de plomo, amarillo limón (cromato de bario), amarillo de cromo (cromato de plomo), amarillo de cadmio, amarillo de Nápoles (antimoniato de plomo), amarillo ocre, anaranjado de cromo (cromato simple de plomo), bermellón, ocre rojo,

laca alizarina natural, laca carmín (cochinilla), verde de Scheele (arsenito de cobre), verde esmeralda (acetoarsenito de cobre), verde viridian (óxido de cromo hidratado), verde cromo, azul cerúleo (estanoato de cromo), azul cobalto (aluminato de cobalto), ultramar artificial y negro marfil.

En este listado se observa que algunos de los nombres de color de la paleta del pintor están asociados a sustancias u objetos que bien se encuentran en la Naturaleza o se obtienen mediante mezclas simples de elementos químicos. En cambio, el azul de Klein es un color de inspiración tecnológica. No fue hasta mitad del siglo XX cuando proclamó su época azul tras asociarse con un fabricante de pintura de París. Las series monocromáticas de Klein fueron posibles tras la madurez de la industria química (Ball, 2009).

En la actualidad la obtención de colores mediante mezcla de pigmentos se basa en el uso de programas de ordenador que implementan técnicas modernas de formulación, como por ejemplo Colibri de Konica Minolta (Konica Minolta, 2010) o Match AFX de Datacolor[®] (Datacolor, 2007).

El color también es un elemento clave en determinados lenguajes gráficos. Un ejemplo típico, muy relacionado con este trabajo, es el diseño de mapas (CSG, 1985; EEA, 2008). En estos contextos es necesario definir términos como el significado, la ergonomía o la gramática del color.

El significado del color se basa en parte en costumbres locales, por tanto es necesario conocer el significado de los colores a través de las culturas en el caso del diseño de productos disponibles internacionalmente. La ergonomía se centra en la legibilidad de la información gracias al uso del color. La gramática estudia conceptos como el contraste, texturas, degradados y transparencias. Todos estos aspectos de la representación se suelen recopilar en normativas o recomendaciones que faciliten la comunicación y la identificación del mensaje transmitido (Figura 1.2).

El color también tiene un significado propio en otras manifestaciones culturales como por ejemplo la Publicidad, la Moda, la Danza, la Religión, el Arte o la propia historia de la Civilización (Gage, 1997). Esta gran cantidad de “visiones del color” ha atraído la atención de importantes intelectuales de disciplinas aparentemente distantes que incluyen

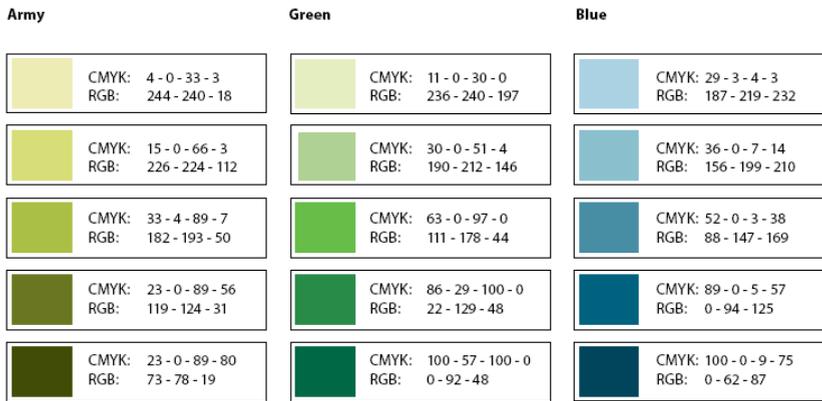


Figura 1.2: Escalas de color mixtas recomendadas por la European Environmental Agency

la Filosofía, la Historia o la Física. Algunos ejemplos destacados son Leonardo da Vinci quien cambió la jerarquía del color de su época y ordenó los colores sistemáticamente en su “Tratado de Pintura”, Goethe que decía que los colores eran el dolor y la alegría de la luz, Wittgenstein quien por su parte argumentaba que el observador no quiere una teoría del color, sino más bien la lógica de los conceptos de color, o Newton que sugirió que el espectro visible estaba gobernado por las mismas relaciones que la escala musical diatónica.

En esta sección hemos visto que el número de disciplinas donde el color juega un papel importante es muy larga. Algunas de ellas han sido comentadas y la lista se puede ampliar fácilmente. El contexto en el que se encuadra este trabajo no es una excepción. Las aplicaciones Agroalimentarias hacen uso rutinario del color con objetivos diversos. El color en los alimentos es un parámetro fundamental en los actuales sistemas de control alimentario (Sun, 2008; Caivano and Buera, 2012). En Agronomía, el color permite diseñar trampas para realizar muestreos de plagas y luchar contra ellas (Ranamukhaarachi and Wickramarachchi, 2007; Russo et al., 2011). Y por supuesto el Color del Suelo, tema central en esta tesis, es fundamental para el estudio sistemático del Suelo.

1.3 Visión del color

David Hubel, autor de un libro de referencia sobre el sistema visual humano (Hubel, 1995), comienza el capítulo dedicado a la visión del color con la siguiente frase:

“Los miles de dólares que los consumidores están dispuestos a gastarse en televisores en color deben indicar que nos tomamos el color muy en serio”.

Sin duda se trata de una frase curiosa y aparentemente fuera de lugar en un libro de contenido científico. Sin embargo, el Premio Nobel de Medicina que recibió en 1981 por sus descubrimientos relacionados con el procesamiento de la información en el sistema visual, le dan la autoridad suficiente para plantear la importancia de la visión en color desde una óptica tan personal. En el resto del capítulo plantea de manera rigurosa la importancia que la visión del color ha tenido en la historia evolutiva del ser humano.

Hubel describe el sistema visual humano a partir de sus experiencias a lo largo de más de 25 años de investigación que finalmente le llevaron a recibir el premio Nobel. En el libro dedica un capítulo a la visión del color, principalmente desde el punto de vista fisiológico, pero hace continuas referencias a otras disciplinas de estudio, principalmente la Física y la Psicológica. El estilo de Hubel llama la atención por su claridad, la cual permite entender el sistema visual a personas sin formación en la materia. Ese estilo tan claro, con numerosas aportaciones procedentes de la vida diaria, es premeditado tal y como él mismo explica en la introducción de otra de sus obras recopilatorias (Hubel and Wiesel, 2005).

La percepción y visión del color forma parte del proceso general de la visión. A lo largo de la historia ha habido diferentes teorías sobre el fenómeno de la visión del color. René Descartes en su obra Principios de Filosofía (1647), describió el circuito neuronal de la visión (Figura 1.3). Según Descartes, los rayos de luz eran capaces de crear una imagen sobre unas pequeñas partículas presentes en los ojos. La imagen formada sería entonces enviada a la glándula pineal, que servía de nexo de unión entre el cuerpo y el alma.

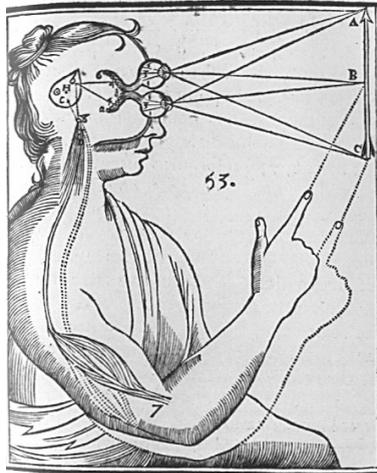


Figura 1.3: Modelo de visión Cartesiana

La historia del estudio sistemático del color comienza con los experimentos realizados por Isaac Newton hacia 1704. Newton planteó la distribución de colores del arco iris bajo una interpretación musical, dividiendo el espectro visible como si se tratara de una octava (Hubel, 1995; Ball, 2009; Malacara, 2002). En su obra *Opticks* de 1706 escribía:

¿Acaso los distintos tipos de rayos no producen vibraciones de distinta grandeza, que según su brillantez despiertan la sensación de los diversos colores, de manera similar a las vibraciones del aire que, según su distinta grandeza, despierta la sensación de los diversos sonidos?

La novedad aportada por Newton no fue la separación de la luz del sol en los colores del Arco Iris, este fenómeno fue descrito previamente por Descartes. En cambio, Newton fue el primero en demostrar experimentalmente que los colores que aparecían al descomponer la luz incidente sobre el prisma ya no podían ser descompuestos en un segundo prisma e introdujo el concepto de “color elemental” por primera vez.

En 1802, Thomas Young propuso la teoría de la naturaleza tricromática del color. Según él sobre cualquier zona de la retina debía haber al menos tres tipos de “partículas” sensibles a tres colores: rojo, verde y violeta. La suposición anterior se basaba en

experimentos en los que obtenían colores nuevos mediante mezclas aditivas de tres colores primarios. Además Young argumentó que era poco probable el hecho de tener tantos tipos de receptores como tonos de color. Esta teoría se confirmó definitivamente por observaciones directas con microscopio en 1959 (Hubel, 1995).

Hermann von Helmholtz recogió 50 años más tarde la teoría de Young y le añadió una variación importante: los tres pigmentos presentes en las partículas sensibles no absorben energía en una única longitud de onda, sino en anchos espectros con una longitud de onda dominante que además se solapan entre sí (Aguilar y Blanca, 1995). Las longitudes de onda correspondientes son 455 nm (azul), 530 nm (verde) y 625 nm (rojo). La teoría se conoció posteriormente como teoría tricromática de Young-Helmholtz.

En 1870 Ewald Hering propuso una teoría del color alternativa basada en combinaciones de seis colores primarios: rojo, azul, verde, amarillo, blanco y negro. Estos colores se denominan primarios psicológicos. La visión del color sería debida a tres canales: rojo-verde, amarillo-azul y blanco-negro. La información cromática estaría contenida en los canales rojo-verde y amarillo-azul, mientras que la luminosidad estaría contenida en el canal blanco-negro.

Esta teoría se denominó teoría oponente de la visión debido a que Hering pensaba que debería haber en el ojo, en el cerebro, o quizá en ambos, un mecanismo de oposición en los tres canales mencionados anteriormente. El término oponente hace referencia a la inhibición de uno de los dos colores de un canal a medida que el otro se estimula.

Hering pensó que el procesamiento de las tres señales procedentes de los tres tipos de conos debía ser menos eficiente que el procesamiento de diferencias entre esas tres señales. Su teoría no pudo contar con evidencias observacionales hasta muchos años después. El esquema de funcionamiento de los canales oponentes se observa en la Figura 1.4 donde se indican las combinaciones de las señales procedentes de los conos LMS.

El sistema de Hering puede representar colores que no están presentes en el arco iris, así como algunos colores que no pueden reproducirse mediante mezcla aditiva de colores (Hubel, 1995). Asimismo, esta teoría permite explicar fenómenos que no se pueden explicar con la teoría tricromática, como por ejemplo las imágenes latentes complemen-

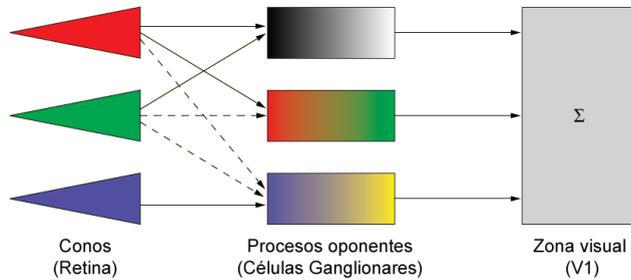


Figura 1.4: Modelo de combinación de señales LMS en la teoría oponente

tarias que se observan después de fijar la vista durante cierto tiempo sobre un objeto. Estas imágenes complementarias están asociadas a la fatiga de la parte del sistema visual que procesa la información del color y al tiempo de recuperación necesario para volver a tener visión normal. La teoría de Hering también explica la imposibilidad de observar mezclas de colores como el verde rojizo o el amarillo azulado.

La teoría de Young-Helmholtz fue adoptada por la Física, mientras que la teoría de Hering fue adoptada por la Psicología. Ambas teorías son aparentemente contradictorias y así permanecieron hasta la década de 1950, cuando se pudieron obtener evidencias fisiológicas de los fenómenos inhibitorios del cerebro. En la segunda mitad del siglo XX con el avance de técnicas como la neuroimagen, se descubrieron grupos de células ganglionares y células del tálamo que presentan este comportamiento oponente en concordancia con la teoría de Hering (Griggs, 2012). A partir de entonces, se adoptaron ambas como correctas, la primera a nivel de los fotorreceptores y la segunda en el resto de etapas posteriores del circuito visual.

El ojo humano

El ojo es el sensor humano que capta y transforma la energía luminosa. El ojo tiene una forma aproximadamente esférica con un diámetro aproximado de 25 mm (Aguilar y Blanca, 1995). El globo ocular está estructurado en varias capas que cumplen funciones específicas (ver Figura 1.5). La capa más externa incluye la cornea en la parte anterior

y la esclerótica en la parte posterior. La cornea es transparente y redirige la luz entrante hacia el interior del ojo curvando los rayos luminosos. La esclerótica es una capa más gruesa y resistente de color blanco.

La capa central contiene la coroides que cubre la mayor parte de superficie del globo y alberga los vasos sanguíneos. En la parte anterior, esta capa central contiene el cuerpo ciliar y el iris, formados por tejido conjuntivo. La zona frontal presenta una apertura llamada pupila que permite el paso de la luz.

En la parte posterior al iris se encuentra una lente denominada cristalino. El espacio entre la córnea y el cristalino se divide en dos cámaras, separadas por el iris y conectadas por la pupila, denominadas cámara anterior y cámara posterior. Las dos cámaras están rellenas de un líquido llamado humor acuoso que ayuda a mantener la forma de la parte anterior del ojo, además de garantizar la humedad y nutrición del cristalino.

La capa interna se denomina retina y contiene los fotorreceptores responsables de la visión en color. La retina está cubierta externamente por una capa de células epiteliales. La retina está en contacto con la coroides por la parte externa y por la parte interna esta en contacto con el humor vítreo que es un gel transparente que ocupa el interior del ojo y le da forma quasiesférica.

El iris es el elemento que da color a los ojos y está formado por músculos que permiten variar la apertura de la pupila mediante contracciones o dilataciones en función de la cantidad de luz ambiental. El cristalino es la lente del ojo y está soportado por unas fibras, los ligamentos suspensorios, que a su vez están unidos a los músculos del cuerpo ciliar. El cuerpo ciliar es responsable de acomodar el cristalino para lograr el enfoque correcto y también de la producción del humor acuoso. El concepto de acomodación indica un cambio en la forma física de la lente para conseguir el enfoque adecuado. El enfoque de objetos cercanos requiere una lente más gruesa y curvada, mientras que en el enfoque de objetos lejanos la lente es delgada y plana. Las patologías más conocidas relacionadas con la acomodación son la miopía o dificultad para ver objetos lejanos con nitidez y la hipermetropía o dificultad para ver objetos cercanos. En estos casos se produce un enfoque anterior o posterior a la posición de la retina lo cual produce visión de imágenes

borrosas.

En ocasiones puede ser ilustrativo comparar esta estructura anterior del ojo humano con una cámara fotográfica, donde el iris se corresponde con el diafragma y el cristalino con el sistema óptico de la cámara, aunque aquí acaban las similitudes.

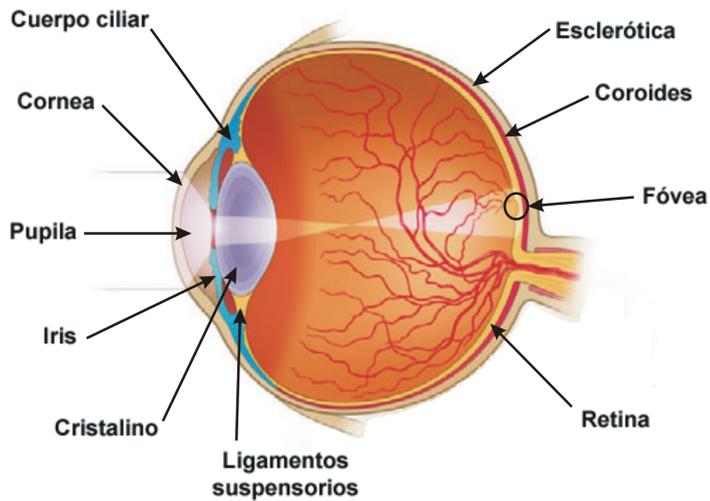


Figura 1.5: Anatomía del ojo humano

La retina contiene las células sensibles a la luz o fotorreceptores que proporcionan los impulsos eléctricos que serán procesados en posteriores etapas neuronales. El espesor total de la retina es de medio milímetro y se estructura en tres capas de células, la capa interna está formada por células ganglionares, la central por células bipolares y la capa externa contiene los fotorreceptores (Figura 1.6). Una vez la energía luminosa llega a los fotorreceptores, éstos convierten la energía luminosa en impulsos eléctricos que son transmitidos a la capa de células bipolares, las cuales transmiten a su vez la información a la capa de células ganglionares.

Los axones de las células ganglionares se unen en un haz que finalmente forma el nervio óptico, el cual es el encargado de enviar la información sobre la imagen visual

al cerebro. El nervio óptico atraviesa la retina por un punto en el cual no es posible la visión y que se denomina punto ciego. En la mayor parte de situaciones no somos conscientes de la existencia del punto ciego porque nuestro cerebro es capaz de rellenarlo con información visual.

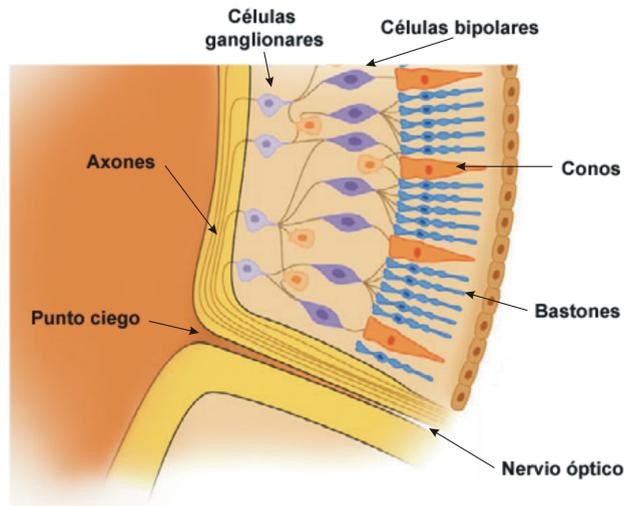


Figura 1.6: Estructura de la retina

Hay dos tipos de receptores denominados conos y bastones. A su vez se pueden distinguir tres tipos de conos encargados de absorber preferentemente energía con longitud de onda larga (L), media (M) y corta (S). Cada tipo de fotorreceptor contiene diferentes pigmentos encargados de absorber y transformar la energía que llega a la retina. La absorción de luz produce una serie de reacciones químicas que dan como resultado una carga eléctrica y la liberación de un neurotransmisor en la sinapsis de la célula nerviosa. A medida que el pigmento absorbe luz llega a un estado en el que no puede transformar más energía debido a cambios en su estructura molecular. En esta situación de saturación se produce otra cadena de reacciones químicas que devuelven al pigmento a su estructura inicial (Hubel, 1995).

La relación entre bastones y conos es de 20 a 1. La retina contiene aproximadamente

120 millones de bastones y 6 millones de conos. Los tres tipos de conos están repartidos con unas proporciones promedio L:M:S de 20:40:1. Las diferencias entre individuos en esta relación son importantes, aunque los experimentos demuestran que no afectan a la visión en color (Deeb and Motulsky, 2005). Los conos están localizados fundamentalmente en una zona central de la retina, deprimida respecto de su entorno, llamada fovea, mientras que los bastones se sitúan en la periferia (Figuras 1.7 y 1.8).

Existen algunos estudios específicos sobre la distribución de estas células sobre la retina (Curcio et al., 1990; Jonas et al., 1992; Hadjikhani and Tootell, 2000; Li et al., 2010). Estos trabajos dan cantidades totales ligeramente diferentes de conos (2.6-5.3 millones) y de bastones (47.2-107.3 millones) dependiendo de la edad del sujeto estudiado, de la longitud axial del ojo o del método de cálculo empleado para estimar las cantidades de fotorreceptores. La densidad media de conos en la zona foveal es de 199000 conos·mm⁻² aunque existe gran variabilidad entre individuos (100000-324000 conos·mm⁻²). La densidad de conos desciende hacia la zona periférica, pero en proporciones diferentes en las zonas nasal y temporal. En la zona periférica nasal la densidad es aproximadamente un 40% superior que en la temporal. Asimismo, la densidad es ligeramente superior en la periferia inferior que en la superior.

En cuanto a los bastones, la zona foveal se puede considerar libre de ellos en una amplitud de 1.25°, equivalente a 0.35 mm alrededor de la fovea. La densidad de los bastones aumenta con la excentricidad respecto de la zona foveal, en forma de anillo elíptico, siendo máxima en la zona nasal superior. Es interesante destacar que tanto las cantidades totales de fotorreceptores como la distribución de los mismos puede variar hasta en un 8% en los dos ojos de un mismo individuo. La distribución tipo, así como el mosaico formado se observan en la Figura 1.8.

Existen dos denominaciones para los conos. La denominación LMS hace referencia a la longitud de onda dominante de la luz absorbida por cada tipo de cono. Los conos L absorben la luz mayoritariamente en las longitudes de onda largas correspondientes al rojo, mientras que los conos de tipo M y S lo hacen en las longitudes de onda medias correspondientes al verde y longitudes de onda cortas correspondientes al azul respecti-

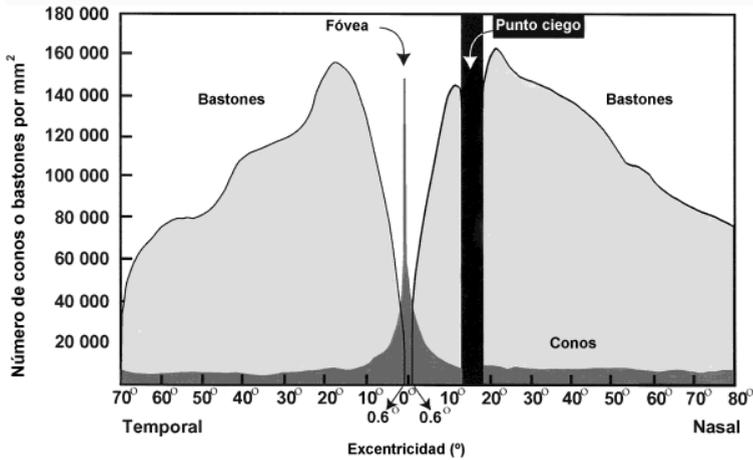


Figura 1.7: Densidad de fotorreceptores

vamente. Por esta razón también es usual denominar los tres tipos de conos como rojo, verde y azul o RGB, aunque en Medicina y Fisiología es más habitual la denominación LMS. Es conveniente destacar que la denominación RGB hace referencia a la longitud de onda dominante del espectro de absorción.

Los conos se encargan de la visión diurna o fotópica, mientras que los bastones participan en la visión con poca intensidad de luz o visión escotópica. La visión en color sólo se da en el caso de visión fotópica. Asimismo, la visión fotópica proporciona imágenes más claras que la visión escotópica. Esto es debido a que existen un mayor número de conexiones entre los conos y las células bipolares que entre los bastones y las células bipolares. Normalmente, cada cono de la zona foveal se comunica directamente con una célula bipolar, mientras que en el caso de los bastones, una célula bipolar recibe la señal de varios fotorreceptores, lo cual se traduce en una imagen menos definida.

La existencia de tres tipos de receptores de color sugiere de manera bastante clara una naturaleza tricromática de nuestro sistema de visión en color. La evidencia experimental así lo atestigua (Aguilar y Blanca, 1995) y de hecho los colores primarios utilizados en numerosos experimentos de igualación o correspondencia de color se basan en la mezcla de ciertas cantidades de luz roja, verde y azul (Capítulo 2).

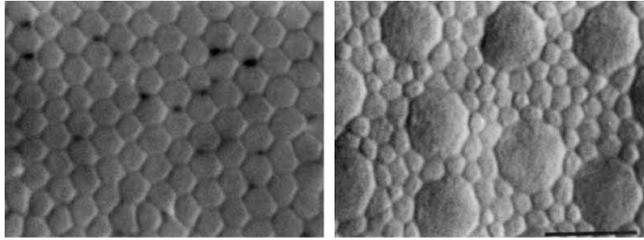


Figura 1.8: Mosaico formado por los fotorreceptores en la zona central (izquierda) y periférica (derecha) de la retina

El pigmento presente en los bastones se denomina rodopsina. La curva de absorción de este pigmento tiene un máximo en la zona del verde (Figura 1.9). En el pasado la rodopsina adoptó el nombre de púrpura visual debido al color que presentaba al microscopio, de hecho la etimología de este término procede del griego rhodon (rosa) y opsis (visión). Esta denominación se basa en la radiación emitida por los bastones, al contrario que en el caso de los conos que se nombran por la radiación absorbida y no por la radiación emitida (Hubel, 1995).

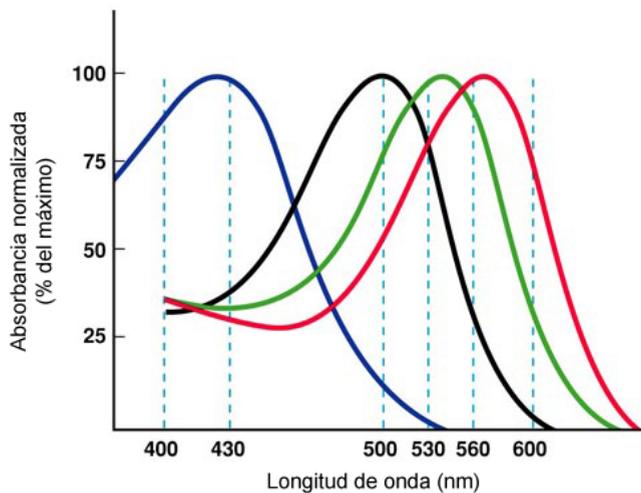


Figura 1.9: Espectros de absorción de conos y bastones

El estudio genético de los pigmentos visuales muestra algunos datos interesantes sobre

la historia evolutiva del ser humano. Los resultados de Nathans a principios de la década de 1980 mostraron que los genes de los pigmentos de los conos rojos y verdes (presentes en el cromosoma X) eran prácticamente idénticos en sus secuencias de aminoácidos (96% de identidad). Mientras que los genes del pigmento de los conos azules (cromosoma 7) y de la rodopsina (cromosoma 3) mostraban diferencias mucho mayores entre ellos y en comparación con los genes de los pigmentos rojos y verdes.

Estos resultados sugieren que en el pasado, un pigmento primordial fue el origen de la rodopsina, del pigmento azul y de un pigmento precursor de los pigmentos rojo y verde. Este último pigmento precursor daría lugar posteriormente a los genes de los pigmentos verde y rojo mediante un proceso de duplicación. Esta duplicación debió ocurrir después de la separación de los continentes americano y africano hace 30 o 40 millones de años, puesto que los primates de África muestran la duplicidad de los pigmentos rojo y verde, mientras que en el caso de los monos del nuevo mundo no es así.

Existen patologías del sistema visual relacionadas con ciertos defectos en los receptores del color que han sido bien documentadas en la bibliografía (Carlson, 2013). En la bibliografía en castellano, estas patologías se agrupan bajo el nombre de daltonismo e incluye cuatro modalidades. La patología más común es el daltonismo tricromático anómalo, en el cual existen defectos funcionales en los tres tipos de conos y cuyo efecto es la percepción de colores alterados. El daltonismo dicromático se divide en tres grupos: pronatopia (confusión de conos verdes y rojos), deuteranopia (ausencia de receptores de color verde) y trinatopia (ausencia de receptores de color azul). El daltonismo monocromático se da en sujetos que sólo disponen de un pigmento funcional, para los cuales el color y la intensidad del estímulo visual son básicamente equivalentes. El caso más extremo es el daltonismo acromático o ceguera al color en el que no funciona ninguno de los tres tipos de conos o pigmentos. Esta patología se denomina acromatopsia y afecta aproximadamente a 1 de cada 30000 o 40000 personas a nivel mundial. Las personas que padecen acromatopsia viven literalmente en un mundo de niveles de gris.

Sacks (1999) documentó una población con una inusual incidencia de la acromatopsia en Pingelap, una pequeña isla del Pacífico. En esta isla la proporción de población afectada

tada es de 1 de cada 12 personas. Parece ser que el origen de esta alta incidencia tiene su origen en 1775, cuando tuvo lugar un tifón llamado Lengkieki. Se estima que el 5% de la población que sobrevivió poseía un gen recesivo reponsable de esta anomalía. La cultura local ha creado el término Maskun para referirse a la acromatopsia. Otro caso parecido se documentó en la isla de Fuur en Dinamarca.

La visión en color está presente en muchos animales vertebrados, principalmente primates, así como en algunas especies de aves, anfibios, reptiles y peces, y en ciertos insectos como mariposas, abejas o moscas. Los animales de costumbres nocturnas no suelen tener visión en color, lo cual indica algún tipo de incompatibilidad entre la visión nocturna y la visión en color. En el caso particular de los mamíferos, la visión en color, sin ser universal, tiene un carácter tan generalizado que se considera como una evidencia de primer orden para considerarla como uno de los elementos fundamentales relacionados con la supervivencia en su historia evolutiva (Jacobs, 2009).

Las capacidades de visión en color de algunas especies animales se pueden experimentar entrenando a un grupo de ejemplares a reconocer los colores. El tipo de entrenamiento depende de cada especie. Por ejemplo, Kinoshita et al. (1999) entrenaron a mariposas de la especie *Papilio xuthus* para reconocer discos de un color determinado. El color a reconocer se denomina habitualmente color test o color objetivo en este tipo de experimentos. En la primera fase del entrenamiento los discos de color se impregnaron de una solución azucarada. Una vez las mariposas aprendieron a reconocer los discos de color con la solución azucarada, se cambió el experimento con un conjunto de discos que no contenían alimento. En esta segunda fase las mariposas siempre se desplazaban a los discos del color objetivo, aun sin contener alimento. El conjunto de discos contenía cuatro colores: rojo, verde, azul y amarillo, así como varios discos grises con la misma luminancia que el color objetivo. La prueba se realizó cambiando el color objetivo obteniendo el mismo resultado, lo cual permite afirmar que *Papilio xuthus* posee visión en color.

Spaethe et al. (2006) hicieron un experimento similar con abejas (*Apis mellifera*). En este caso entrenaron a las abejas a reconocer un color objetivo frente a un conjunto de colores distractores. En el experimento observaron que el tiempo y la precisión de

la búsqueda eran inversamente proporcionales al número de distractores del campo de pruebas, mientras que la relación era directamente proporcional al número de discos del color objetivo presente. Este tipo de conducta visual se denomina búsqueda visual en serie y está presente en los primates y en el ser humano. El experimento también mostró que las búsquedas eran menos precisas cuando el color objetivo era azul y los distractores amarillos que a la inversa. Este fenómeno se denomina búsqueda asimétrica.

En otros casos las características cromáticas de la visión de las especies animales se lleva a cabo examinando muestras de tejido. Las muestras de retina son sometidas a iluminaciones con diferente composición espectral, registrando la respuesta espectral de la energía reflejada con microespectrofotómetros. En el caso particular de muestras de tejido retinal humano se recomienda que las muestras sean examinadas antes de 72 horas *post mortem* y que procedan de donantes menores de 60 años (Bowmaker et al., 2003). Existen otras técnicas que han sido aplicadas en estudios de electrofisiología de la visión con humanos y con otras especies entre las cuales están los electrodos montados en lentes de contacto, los hilos conductores de diversos materiales en contacto directo con la córnea (Hogg and Nusinowitz, 2006; Coupland, 2006) o la reconstitución de los pigmentos visuales con isómeros sintéticos de retinaldeido (Bowmaker et al., 2003).

Existen especies que además de utilizar distintos tipos de receptores cromáticos disponen de otros mecanismos de visión como por ejemplo las imágenes térmicas o la polarización. Algunas especies de serpientes y el camarón mantis (*Gonodactylus smithii*) son dos ejemplos bien conocidos de estos sistemas de visión mejorados.

Las serpientes de las familias Viperidae, Pythonidae y Boidae poseen unos órganos sensoriales en forma de foseta que permiten la entrada de radiación infrarroja emitida por sus potenciales presas. Se cree que estos órganos funcionan como una cámara oscura, obteniendo una imagen de baja resolución de la presa gracias a la energía infrarroja que entra en el órgano e impresiona una membrana sensible de manera similar a una película fotográfica. Dependiendo del tamaño de la apertura las imágenes formadas tienen forma de punto o de anillo (Figura 1.10) con gran cantidad de ruido debido principalmente a las condiciones ambientales y al movimiento de los elementos que conforman el entorno.

Posteriormente el cerebro de la serpiente crea una imagen mejorada, en ocasiones ayudada por la imagen que captan los ojos, gracias a unas células nerviosas bimodales específicas (Newman and Hartline, 1981). En estudios recientes se ha propuesto un modelo computacional para este sistema de visión en el cual se introducen como variables la apertura del órgano, el espesor de la membrana, tamaño de la membrana, número de células sensibles y resolución de la imagen térmica (Sichert et al., 2006).

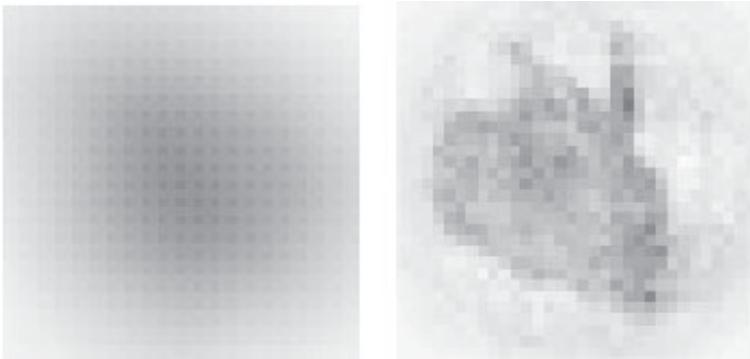


Figura 1.10: Simulación del procesamiento de imágenes captadas por una serpiente

En el caso del camarón mantis la mejora del sistema de visión consiste en la adopción de un número alto de fotorreceptores y de la posibilidad de polarizar la iluminación recibida (Kleinlogel and White, 2008). Los ojos de este crustáceo son muy complejos y se dividen en tres matrices de sensores (Figura 1.11). La parte superior se denomina hemisferio dorsal, la parte central se denomina banda ecuatorial y la parte inferior hemisferio ventral. La banda ecuatorial presenta 6 filas de omatidios. Estos pequeños sensores se dividen en dos zonas, las cuatro filas superiores están especializadas en la captura de información de color. Se han encontrado 11 pigmentos que permiten captar energía en el rango de longitud de onda que va desde 290 nm a 730 nm. Las dos filas inferiores están especializadas en la polarización circular de la luz. Los dos hemisferios son los encargados de polarizar la luz linealmente. En experimentos recientes se ha observado que los sensores especializados en la polarización combinan la polarización lineal y esférica resultando en seis tipos de polarización. Los objetivos de este rango tan amplio de polarizaciones

incluye la localización de presas, la orientación, la navegación y las interacciones sociales con miembros de su misma especie (Chiao et al., 2000; Kleinlogel and White, 2008).

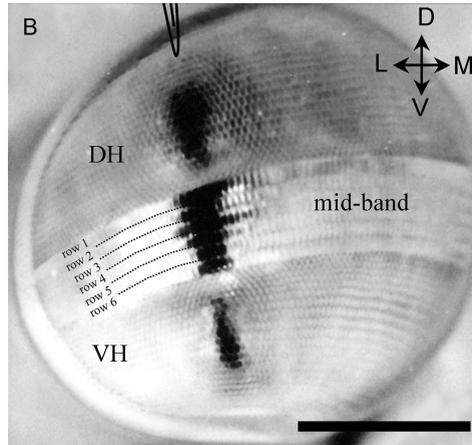


Figura 1.11: Estructura del ojo de *G. smithii*

La ruta visual

Una vez los fotorreceptores han captado la energía luminosa y la han transformado en impulsos eléctricos, las señales recorren una determinada ruta neuronal que finalmente será interpretada como una imagen en color. En esta última etapa de la visión del color es fundamental conocer en primer lugar las estructuras del cerebro que intervienen en el proceso de visión y en segundo lugar intentar cuantificar de alguna manera las respuestas a los estímulos que provocan el proceso visual. La primera cuestión está muy estudiada en el área de Anatomía y Neurofisiología (Kahle, 1986; Netter et al., 2002), mientras que la segunda se enmarca dentro del dominio de la Psicología y la Psicofísica (Kalat, 2009; Griggs, 2012; Carlson, 2013), aunque ambas aproximaciones tienen muchos puntos en común.

Es conveniente destacar en primer lugar que existen sistemas neuronales separados para procesar la forma, el color, la distancia y el movimiento, aspectos cuya combinación es la base del proceso de visión. En este trabajo el aspecto más importante es el color y por ello describimos a continuación la ruta visual relacionada con el color. El proceso

está perfectamente esquematizado en la Figura 1.12. Al observar una escena, cada uno de los dos ojos capta un campo visual ligeramente distinto. Esta pequeña diferencia se denomina paralaje y se utiliza en la percepción de la profundidad. Las dos imágenes que se forman en la retina están invertidas con respecto a la escena de acuerdo a las leyes elementales de la óptica. La división en cuadrantes de la Figura 1.12 permite apreciar las proyecciones de la escena sobre la retina.

Las señales generadas en la retina son enviadas a través del nervio óptico. Las fibras de los dos nervios ópticos procedentes de cada ojo se entrecruzan parcialmente en una estructura del cerebro en forma de X llamada quiasma óptico. Las señales procedentes de los hemisferios nasales se cruzan en el quiasma, cambiando de lado hacia el tracto óptico opuesto. En cambio, las señales procedentes de los hemisferios temporales permanecen en el mismo tracto óptico lateral que el ojo donde se originaron. El resultado de este mecanismo es que las fibras del hemisferio temporal del ojo izquierdo y las fibras del hemisferio nasal del ojo derecho forman el tracto óptico izquierdo, mientras que las fibras del hemisferio nasal del ojo izquierdo y las fibras del hemisferio temporal del ojo derecho forman el tracto óptico derecho.

Las señales existentes tras el quiasma óptico llegan a través de los tractos ópticos a los núcleos geniculados laterales (NGL). Estas estructuras reciben su nombre por el parecido con una rodilla doblada (genu es rodilla en Latín). En cada uno de estos núcleos se forma una imagen invertida de la mitad del campo visual observado. En el núcleo derecho se forma la imagen de la mitad izquierda del campo de visión y en el núcleo izquierdo se forma la imagen de la mitad derecha. Esta información se envía a través de las radiaciones ópticas hacia el cortex o corteza visual.

Los NGL están estructurados en seis capas (Figura 1.13), las capas 2, 3 y 5 reciben información desde el ojo ipsilateral, mientras que las capas 1, 4 y 6 reciben información del ojo del lateral opuesto. Existe una relación aproximada entre cada punto del NGL y la retina denominada mapa retinotópico. Este mapa o imagen está deformada con respecto a la imagen impresionada en la retina. La principal diferencia es la superficie ocupada por la zona foveal en la retina y en la corteza visual, en la retina es del 1% mientras que en

la corteza es del 25% (Carlson, 2013). Esta circunstancia demuestra la importancia de la zona foveal en el proceso de visión y en particular de la visión del color.

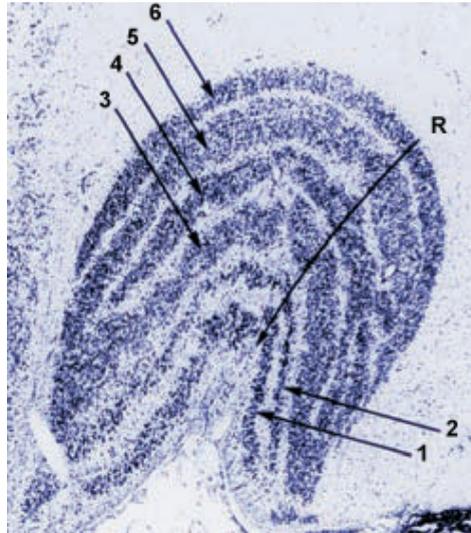


Figura 1.13: Estructura del núcleo geniculado lateral

Las dos capas internas del NGL tienen células de mayor tamaño y por ello se denominan capas magnocelulares (capas 1 y 2). Las cuatro capas exteriores se denominan capas parvocelulares (capas 3, 4, 5 y 6). En la parte ventral de cada una de las seis capas magnocelulares y parvocelulares existen seis subcapas denominadas capas koniocelulares (capas de color claro en la Figura 1.13).

Los campos receptivos (regiones alteradas por el estímulo visual) de las capas del NGL están alineadas como se observa en la línea R. Las células localizadas sobre dicha línea tienen campos receptivos centrados en el mismo punto (Carlson, 2013).

Las radiaciones ópticas están formadas por los axones de las neuronas de los NGL que conectan con la corteza visual primaria (V1) o corteza estriada. La corteza estriada está situada en la parte posterior del lóbulo occipital de nuestro cerebro, rodeando una fisura denominada cisura calcarina.

Los NGL se localizan en el tálamo y además de las funciones visuales desempeñan otras funciones. Se cree que reciben información retroalimentada desde la corteza visual,

así como información de otros sentidos, en particular el oído. Probablemente, estos conjuntos de información están relacionados con conductas del comportamiento como la atención.

La corteza estriada se divide en varias zonas que contienen células específicas para cada aspecto del proceso visual. Existen células especializadas en la orientación de los estímulos visuales, por ejemplo líneas con una determinada orientación. Estas células se dividen en tres grupos: simples, complejas e hipercomplejas dependiendo de la posición del estímulo en el campo visual. Estas células también responden a patrones repetitivos en forma de onda cuadrada o sinusoidal.

En el caso del color, la corteza estriada recibe información desde las capas parvocelulares y koniocelulares presentes en los NGL. La información de los conos L y M es enviada a través de las capas parvocelulares, mientras que la información de los conos S se envía a través de las capas koniocelulares. Esta entrada de información mixta también es responsable de la intensidad del estímulo visual. Existen estructuras localizadas en la corteza visual primaria o V1 y en un área adyacente denominada V2 encargadas de recibir la información cromática. Estas estructuras se descubrieron recientemente (último cuarto del siglo XX) y su funcionamiento todavía está en periodo de investigación. Las estructuras de la zona V1 tienen forma alargada y sección elíptica, mientras que las estructuras de la zona V2 forman un patrón con tres tipos de bandas (Carlson, 2013).

Se ha demostrado que la zona V1 se activa sin observar ninguna escena, simplemente cerrando los ojos e imaginando una imagen. Esto indica que seguramente la zona V1 está relacionada con la percepción visual consciente, aunque no se sabe con que mecanismos (Kalat, 2009). La ruta visual en la corteza visual primaria tiene conexiones con otra zona de la corteza cerebral llamada V4 y con la corteza de las zonas parietal posterior y temporal inferior. En el caso particular del color y la intensidad del estímulo luminoso, la conexión más importante es la de la corteza temporal inferior y el conjunto total de rutas visuales entre estas zonas se denomina vía occipitotemporal o corriente ventral. El área V4 es especialmente importante para la constancia de color, tema que aparecerá posteriormente en este trabajo, así como en la atención visual.

Las lesiones en la corteza visual producen alteraciones visuales como por ejemplo la visión ciega o *blindsight*. Se han descrito casos de sujetos con daños en la zona V1 que respondían a estímulos y podían dirigir su atención hacia un punto emisor de luz, aunque al mismo tiempo decían que no eran conscientes de ver nada. Estas lesiones también pueden provocar la ausencia de visión en sueños. Los experimentos sugieren que esta área se comunica con la zona V2 y con otras zonas del cerebro relacionadas con el movimiento para responder a los estímulos visuales. Los pacientes con daños en la zona temporal presentan ausencia de memoria visual y dificultad general para explicar lo que ven.

Las lesiones en el área V4 afectan a la visión en color pero no a la agudeza visual. En algunos casos la pérdida de visión en color es total, en cuyo caso se habla de acromatopsia cerebral. Este tipo de lesiones puede afectar a uno de los dos ojos en caso de una lesión asimétrica (Carlson, 2013).

La ruta visual completa descrita en los párrafos anteriores se denomina ruta geniculoesférica, o en ocasiones ruta retinogeniculoesférica. A nivel físico, la ruta visual completa desde que la energía luminosa llega a la retina, está compuesta por cuatro tipos de neuronas dispuestas en serie: los fotorreceptores, las células bipolares, las células ganglionares (nervio óptico) y las radiaciones ópticas (Kahle, 1986).

Las imágenes que percibimos en nuestras actividades cotidianas son la interpretación de las imágenes que obtenemos en nuestra corteza visual después de un proceso bastante complejo y que todavía no se comprende en su totalidad. La relación de esas imágenes mentales con el mundo físico y su cuantificación se lleva a cabo con los métodos psicofísicos. Estos métodos tratan nuestro cerebro como una caja negra, intentando relacionar entradas y salidas, o estímulos y respuestas, para identificar las funciones que realiza el sistema cognitivo.

Los métodos de investigación psicofísica se iniciaron en Alemania en el siglo XIX. El objetivo de estos métodos es ciertamente complicado y consiste básicamente en obtener la relación existente entre el mundo real o físico y el mundo psicológico. En el caso de la visión se centran en describir el comportamiento de los impulsos eléctricos generados

por los receptores situados en la retina a lo largo de la ruta visual. Existen tres cuestiones fundamentales en los métodos psicofísicos: la cuestión de la detección, la cuestión de la diferencia y la cuestión de la escala (Griggs, 2012). Los experimentos psicofísicos se llevan a cabo con sujetos humanos a los cuales los investigadores hacen preguntas relacionadas con la percepción de los estímulos recibidos.

La primera cuestión hace referencia a la detección, es decir, cual es la cantidad mínima de estímulo que somos capaces de detectar para crear una sensación. El objetivo de los primeros experimentos era obtener un umbral a partir del cual un estímulo es detectable o no. La evidencia experimental demuestra que no es posible encontrar un umbral absoluto. En su lugar se utilizan umbrales estadísticos que representan la cantidad de energía contenida en el estímulo que es detectada al menos en el 50% de los casos.

La segunda cuestión importante es saber cual es la diferencia mínima necesaria para que dos estímulos visuales sean distintos. Al igual que en el caso de la detección, no existe un umbral exacto, sino un umbral estadístico definido en función del parámetro diferencia de color. Este umbral se denomina mínima diferencia detectable que en su forma inglesa es JND (*just noticeable difference*). El umbral o diferencia mínima no es constante y depende de la magnitud del estímulo utilizado como referencia. Existe una ley, llamada ley de Weber o Weber-Fechner, que establece una fracción de 0.08 para los experimentos visuales de evaluación de la luminosidad de estímulos visuales. Esta fracción se aplica al valor de referencia del experimento, de modo que en experimentos con estímulos mayores, los umbrales serán mayores. Esta relación no se cumple para estímulos extremos donde no será posible detectar diferencias.

La última cuestión básica en los métodos psicofísicos es la cuestión de la escala. Probablemente, esta es la más importante de las tres en el estudio de la visión en color y trata de evaluar como se relacionan las escalas de medida de magnitudes físicas y magnitudes perceptuales. Esta cuestión no se conoció hasta la segunda mitad del siglo XX, lo cual provocó algunas limitaciones en el diseño de los espacios de color desarrollados en 1930, donde se asumía la equivalencia entre luminancia y claridad (Capítulo 2). En este caso existe una ley denominada ley exponencial de Stevens la cual establece que la mag-

nitud percibida ante un estímulo es igual a la magnitud física de dicho estímulo elevada a un cierto exponente.

En el caso de los estímulos visuales las magnitudes percibidas siempre son menores que las magnitudes físicas, es decir, los exponentes de la ley de Stevens son menores que la unidad. La intensidad luminosa es un ejemplo importante en Colorimetría. Los primeros espacios de color representaban esta magnitud en términos de luminancia (Y), expresada en unidades físicas ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$), mientras que en espacios de color más modernos se eligió el término claridad que es directamente proporcional a $Y^{1/3}$ (ver Capítulo 2).

Uno de los resultados fundamentales de la aplicación de los métodos psicofísicos a la Fotometría y a la Colorimetría es la función de luminosidad, función de eficiencia luminosa o curva de visibilidad $V(\lambda)$ (Aguilar y Blanca, 1995). La función de luminosidad representa la sensibilidad del ojo humano a la intensidad luminosa en función de la longitud de onda del estímulo (Figura 1.14). El objetivo de esta función es obtener un equivalente psicofísico de la radiancia al que se denomina luminancia, básico en Fotometría (Capítulo 2). Esta curva no tiene relación con las curvas de absorción de los conos (Figura 1.9). La diferencia fundamental es de tipo fisiológico y reside en que las curvas de visibilidad dependen del estado de adaptación cromática de los ojos, mientras que en el caso de la absorción de los conos no es así. Esto hace que el uso de las curvas de visibilidad sólo sea válido en las condiciones de iluminación en las que se realizaron las medidas de los valores de la curva. En este sentido hay que destacar que existen dos curvas de visibilidad para visión fotópica y para visión escotópica $V'(\lambda)$.

Existen fundamentalmente dos procedimientos para obtener estas curvas a partir de medidas relativas respecto de un estímulo de referencia mediante una escala de proporción o de ratios.

La primera aproximación y más sencilla conceptualmente consiste en cuantificar magnitudes radiométricas, por ejemplo la radiancia. Una luz con longitud de onda y radiancia fijas servirá de estándar. La radiancia de una segunda luz con longitud de onda diferente se ajustará hasta que el observador perciba los estímulos con la misma luminosidad. Este método tiene la desventaja que es difícil ajustar la luminosidad de dos luces de diferente

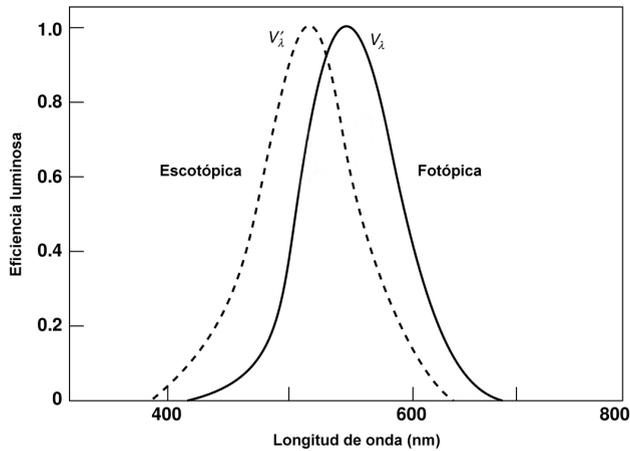


Figura 1.14: Curvas de visibilidad fotópica y escotópica

longitud de onda.

La segunda aproximación es más compleja y se basa en un método denominado fotometría intermitente heterocromática o *heterochromatic flicker photometry* (HFP). Esta técnica se basa en reducir al mínimo la sensación de parpadeo entre dos campos visuales contiguos. En uno de los campos se visualiza el estímulo de referencia de longitud de onda conocida y en el otro campo se visualiza el test (el estímulo cuya respuesta se desea evaluar) que tiene una longitud de onda distinta al estímulo de referencia. El observador ajusta la intensidad del test hasta que la diferencia entre los dos campos se anula o se minimiza. En ese momento las intensidades luminosas de los dos estímulos permiten obtener una relación entre la referencia y el test.

A lo largo del tiempo se han publicado distintas versiones de esta curva. La primera versión se publicó en 1924 por la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) y fue el resultado de varios experimentos independientes. En ediciones posteriores se publicaron nuevas curvas que incorporaban correcciones procedentes de nuevos datos experimentales y que afectaban sobre todo a las longitudes de onda de la zona del azul. La versión definitiva de la curva de sensibilidad fue publicada por la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) en 1978 (Figura 1.14).

Esta función es la base de diversos desarrollos teóricos y prácticos existentes en la Ciencia y la Ingeniería del Color. La propia definición de los espacios de color se basa en el concepto de función de igualación de color (CMF por su denominación color matching function en inglés). Las funciones de igualación de color se establecieron de modo que la función \bar{y} coincidiera con $V(\lambda)$ (Capítulo 2). Asimismo, el diseño del filtro de Bayer, dispositivo utilizado en muchas cámaras fotográficas digitales modernas, intenta imitar el sistema visual humano que es más sensible en la longitud de onda del verde, tal y como se desprende de la propia gráfica de la función de eficiencia.

Anteriormente se comentó que existen dos curvas de visibilidad para los dos modos fundamentales de visión denominados visión fotópica y visión escotópica. La visión fotópica se produce con valores de iluminación de $3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ o superiores, mientras que la visión escotópica se produce con iluminaciones menores, del orden de $0.003 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ e inferiores (la definición de las unidades fotométricas se puede consultar en la Sección 2.1). Estos valores son aproximados y dependen de otros factores como por ejemplo el color del estímulo observado (Ohta and Robertson, 2005). En algunos textos aparece el término visión mesópica que indica un modo de visión intermedio.

El modo de visión, fotópica o escotópica, es fundamental para los experimentos de visión puesto que determina los receptores involucrados en el propio proceso de visión. En el caso de la visión fotópica únicamente participan los receptores cromáticos o conos, mientras que en visión escotópica intervienen fundamentalmente los bastones o receptores acromáticos. En los modos intermedios participan en diverso grado tanto los receptores cromáticos como los acromáticos. Esta cuestión relativa a los receptores que participan en el proceso de visión se tomó en consideración para realizar los experimentos que finalmente dieron como resultado los espacios de color CIE de 1931 (Capítulo 2). En particular el ángulo del campo visual de 2° se eligió para que los estímulos luminosos captados por los observadores afectaran únicamente a la zona foveal en la cual se produce la máxima densidad de conos y por tanto se dan condiciones de visión tricromática (Broadbent, 2004).

Las teorías de visión del color descritas en párrafos anteriores permiten responder

algunas cuestiones básicas que son fundamentales para el tratamiento numérico del color. Por ejemplo, ¿Cuántos colores primarios existen?, ¿Cuántas dimensiones tiene el color? o ¿Cuántos colores somos capaces de distinguir?

La primera cuestión importante en cualquier teoría del color es conocer el número de colores primarios, es decir, el número de colores mínimo a partir de los cuales se puede crear una cantidad casi ilimitada de colores. Existen dos teorías que se han mostrado válidas: la teoría tricromática y la teoría oponente. La teoría tricromática es la que adquiere validez en la primera etapa del proceso de visión del color donde intervienen los conos. Esto llevó a desarrollar una familia de modelos de representación del color con tres componentes, entre los cuales destaca el modelo CIE RGB que se describe en detalle en el Capítulo 2. La evidencia experimental apoya esta este enfoque.

La segunda cuestión está claramente relacionada con la primera. Parece natural que el número de dimensiones de un espacio de color coincida con el número de componentes cromáticos utilizados para caracterizar y en su caso medir los estímulos de color. Todos los espacios de color tienen tres dimensiones, aunque existen diferencias en la característica cromática representada en cada uno de los ejes de coordenadas.

En esta sección se ha visto que el sistema neuronal dispone de elementos específicos para procesar la intensidad luminosa y el color de los estímulos. La conveniencia de utilizar una descripción de color basada en tres componentes puramente cromáticos o en un componente de intensidad y dos componentes de color depende de cada aplicación. El primer caso es adecuado para el tratamiento numérico, mientras que el segundo caso es adecuado para la descripción de colores según el sistema de percepción visual humano. Por tanto los espacios de color deben permitir la transformación entre una representación puramente cromática y su correspondiente representación perceptual. Abney en su tratado sobre la medición y mezcla del color de 1891 se refería a estas tres variables perceptuales del color como tono, luminosidad y pureza (hue, luminosity, and purity), estableciendo que si estas tres variables se determinan, la medida de un color es completa (Abney, 1891).

La tercera cuestión es el número de colores que podemos distinguir. Su importancia no está relacionada con el tratamiento del color en sí mismo, sino con otros aspectos del color

como la evolución o las patologías del sistema visual. No existe unanimidad en cuanto al número de colores que podemos distinguir, los valores existentes en la bibliografía van desde 10000 hasta 10 millones.

La mayor parte de la información presentada en esta sección puede influir en la definición de un marco teórico y práctico preciso para la medición del color. La disciplina encargada de la medición del color es la Colorimetría y sus principios fundamentales se describen en el Capítulo 2. Esta disciplina se diferencia de la medición de otras magnitudes físicas en su alto grado de subjetividad y en este sentido el color depende del observador. Es la diferencia entre trabajar con magnitudes puramente físicas y magnitudes psicofísicas (Rigg, 1997).

La subjetividad viene dada por fenómenos que tienen lugar en el cerebro y que no se conocen en profundidad. Probablemente el más importante para los objetivos de esta tesis es el fenómeno conocido como adaptación cromática o constancia de color. La constancia de color es el fenómeno por el cual el color aparente de un objeto permanece constante ante cambios en la intensidad o composición espectral de la iluminación ambiental (Foster, 2011).

El cerebro humano es capaz de compensar diferencias de iluminación extremas para que el color percibido de un objeto permanezca aproximadamente constante. Una situación típica de constancia de color es la observación de una escena durante la puesta de sol donde la iluminación tiene una longitud de onda dominante larga en la zona del rojo, en cuyo caso el cerebro es capaz de realizar una operación de sustracción de las longitudes de onda más larga en cada punto de la escena (Carlson, 2013).

El estudio de este fenómeno se inició en el siglo XIX y atrajo el interés de las figuras más importantes de la Ciencia del Color. Sin embargo, el estudio sistemático apoyado por evidencias fisiológicas no se inició hasta épocas recientes, más o menos hace 25 o 30 años. Uno de los resultados más interesantes se debe a von Kries (Aguilar y Blanca, 1995; Foster, 2011) quien propuso un modelo de adaptación cromática que se puede aplicar en dispositivos digitales (Balasubramanian, 2003). Actualmente existen diversos procedimientos computacionales entre los cuales destacan los métodos basados

en técnicas estadísticas Bayesianas (Brainard and Freeman, 1997).

1.4 Sistemas de ordenación de color

Un sistema de ordenación de color es una ordenación sistemática de percepciones de color en función de los atributos cromáticos, de sus características geométricas o de sus características matemáticas (Kuehni, 2003). A nivel práctico, un sistema de ordenación de color proporciona al usuario un procedimiento para determinar y comunicar el color de un objeto visualmente, sin necesidad de instrumentación o cálculos adicionales.

El estudio de la evolución de los sistemas de ordenación del color representa el interés del ser humano por entender y representar el color. Aunque el tratamiento científico del color comienza con los experimentos ópticos de Isaac Newton, han existido muchas otras aproximaciones, anteriores y posteriores, algunas de las cuales se conservan en algunos sistemas de ordenación del color actuales.

La presente sección se centra en los sistemas de ordenación del color como contrapunto a los espacios de color CIE (Capítulo 2). Esta división entre sistemas de ordenación de color y espacios de color resulta conveniente en el contexto de esta tesis donde se utilizarán datos procedentes de ambas aproximaciones. Los sistemas de ordenación del color son conceptualmente distintos a los espacios de color. Un sistema de ordenación de color tiene como objetivo proporcionar una colección ordenada de colores, tratando de representar y agrupar todos los colores reproducibles según la tecnología del momento. En cambio, un espacio de color representa el color numéricamente a partir de observaciones basadas preferentemente en los mecanismos de visión humana. Los espacios de color proporcionan un marco para el tratamiento numérico de la información colorimétrica al contrario que los sistemas de ordenación del color cuyo objetivo principal es la comunicación visual del color.

A lo largo de la historia se han empleado diferentes representaciones de color unidimensionales (rectas), bidimensionales (círculos, triángulos) y tridimensionales (conos, cubos, pirámides, esferas). En todas estas representaciones subyace una lógica de ordenación que intenta asignar una posición a cada color dentro del sistema de representación.

Las representaciones tridimensionales se denominan habitualmente sólidos de color.

La ordenación más sencilla consiste en una escala lineal según el valor de la longitud de onda de la radiación visible. Sobre esta recta se pueden ordenar los colores desde el azul en las longitudes de onda cortas hasta el rojo en las longitudes de onda largas. En este tipo de representación no aparece el color púrpura debido a que no es un color espectral. La Figura 1.1 que representa el espectro visible es el ejemplo típico de la ordenación lineal.

Las representaciones circulares se basan en la ordenación lineal previa, añadiendo el púrpura entre el rojo y el azul y uniendo los extremos de la representación lineal. Las representaciones triangulares sitúan los colores primarios en los vértices de un triángulo, representando el resto de colores mediante gradaciones del tono. Existen representaciones que combinan círculos y triángulos.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) utilizó un sistema de colores primarios basado en la mezcla sustractiva de colores propia de los pintores. Distribuyó los colores en pares opuestos rojo-verde, azul-amarillo y blanco-negro, de una manera que recuerda poderosamente la teoría de Hering. Los sistemas de color existentes hasta la época de Leonardo no tenían una representación gráfica específica y se transmitían verbalmente de maestros a discípulos.

La primera representación gráfica sistemática fue introducida por Newton (1642-1727), quien propuso su círculo de siete colores influenciado por la existencia de las siete notas musicales de la escala cromática (Aguilar y Blanca, 1995; Malacara, 2002). El círculo de Newton asignaba a cada color un sector circular que según sus palabras “era proporcional al número de rayos que formaban cada color” (Figura 1.15). La proporción se refería a la anchura de las bandas de color que observó en su famoso experimento del prisma.

Goethe (1749-1832) ideó un esquema circular con dos triángulos inscritos. En los vértices del primer triángulo se situaban los colores primarios: rojo, amarillo y azul, mientras que en el segundo triángulo, contrapuesto al primero formando una estrella de seis puntas, se situaban los colores secundarios: naranja, verde y púrpura (Figura 1.16).

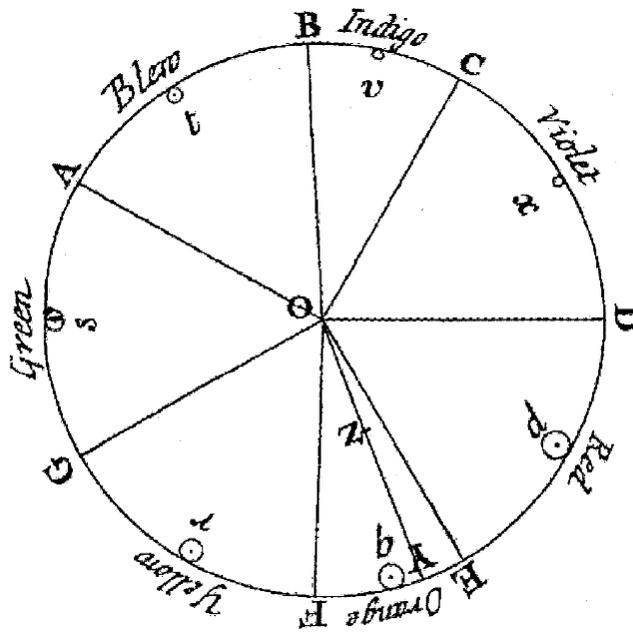


Figura 1.15: Círculo cromático de Newton

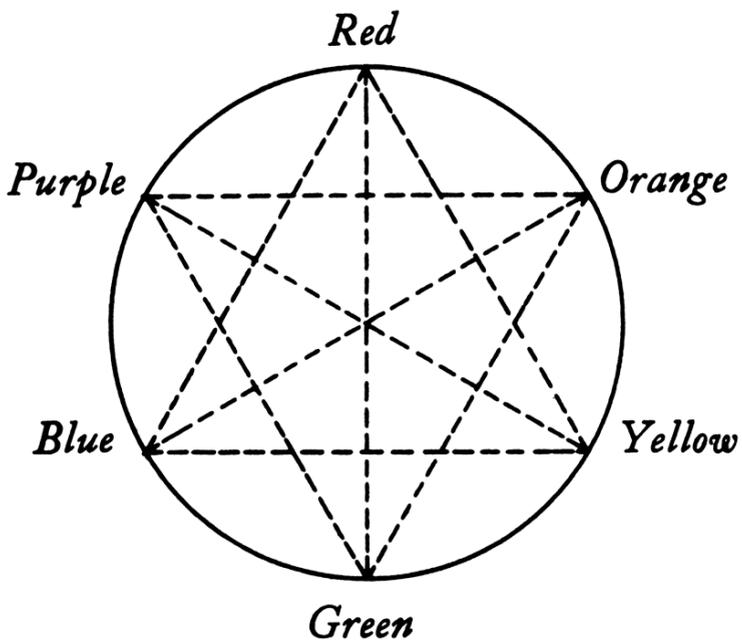


Figura 1.16: Círculo cromático de Goethe

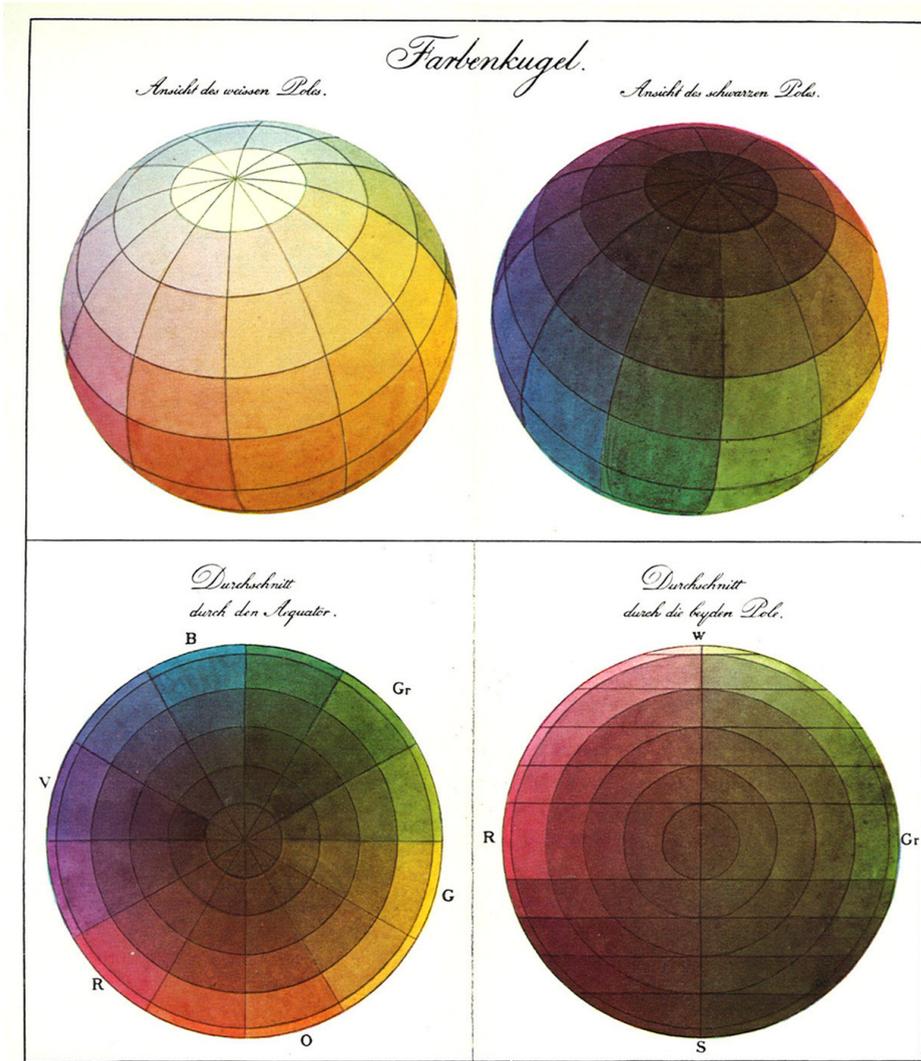


Figura 1.17: Esfera cromática de Runge

Las representaciones tridimensionales del color se basan en el uso de las tres dimensiones del color que se han definido previamente como tono, saturación y claridad, o alguna denominación equivalente.

El primer sistema tridimensional propiamente dicho es la esfera de Runge (1810), aunque previamente algunos otros autores habían propuesto sistemas de mezclas de colorantes tridimensionales (Caivano, 1995). Sin embargo, Runge propuso una esfera que incluía “todo el conjunto de sensaciones posibles y no un sistema de mezclas de pigmentos” que denominó *Farbenkugel* (Figura 1.17).

Hasta finales del siglo XIX no se producen cambios significativos en la representación de los sistemas de ordenación de color. Es en esa época cuando comienzan a gestarse dos sistemas fundamentales en la historia de la Ciencia del Color en general y en la Ciencia del Suelo en particular: el sistema Ostwald y el sistema Munsell.

En la actualidad existen varios sistemas de ordenación de color como por ejemplo el *Natural Color System* (NCS), el sistema de la *Optical Society of America* (OSA) o el PANTONE, utilizados en muchas aplicaciones industriales y cuyas descripciones detalladas están disponibles en la bibliografía (Kuehni, 2003; Billmeyer, 1987; Hunt, 1977). El resto de esta sección describe los sistemas Ostwald y Munsell.

Sistema Ostwald

El sistema de W. Ostwald (1853-1932), quien recibió el premio Nobel de Química en 1909, consiste en una especificación del color constituida por tres variables que representan el contenido de tono, contenido de blanco y contenido de negro. La generación de colores se consigue repartiendo los tres contenidos anteriores en un disco que al girar produce una fusión de los tres elementos y da como resultado un color homogéneo. Los tres porcentajes de cada variable determinan cuantitativamente el color generado.

El círculo asociado a este sistema contenía 24 tonos, donde el amarillo tenía el número 1, el rojo el número 7, el azul el número 13 y el verde el número 19 (Figura 1.18). Los colores amarillo y azul están situados de manera diametralmente opuesta sobre el círculo. Lo mismo sucede con los colores rojo y verde. Esta distribución de colores opuestos se

basa en que un disco con iguales porcentajes de ambos colores opuestos, girando a gran velocidad, da como resultado un color neutro o gris medio. Numéricamente se puede localizar el complementario de un color del círculo sumándole o restándole 12. Los colores obtenidos de esta manera están situados en la parte externa del círculo y representan colores puros.

El círculo de colores anterior se complementa con otro elemento que consiste en un eje perpendicular al plano del círculo y que pasa por su centro. Este eje vertical contiene la escala de grises, con ocho niveles de gris que van desde el blanco en la parte superior hasta el negro en la parte inferior. Los niveles de gris se designan con letras del alfabeto a (blanco), c, e, g, e, i, l, n, p (negro).

Un aspecto interesante del eje de grises de Ostwald es que sigue las leyes psicofísicas. Según Ostwald la sensación percibida varía en proporción aproximada al logaritmo del estímulo recibido. En un contexto de escala de grises esto significa que el nivel de gris será proporcional al logaritmo de la reflectancia de la muestra iluminada, o en general de la luminancia del estímulo. Este aspecto concreto se puede considerar una aplicación práctica de la ley de Stevens reseñada en la Sección 1.3.

La especificación del sistema Ostwald termina definiendo la forma del sólido de color. Los tonos puros del borde del círculo se conectan con los extremos del eje de grises mediante triángulos formando un doble cono (Figura 1.19). La distancia desde el borde del círculo hasta el eje se cubre con una secuencia de ocho términos de color en el ecuador del doble cono. Las denominaciones de cada combinación constan de parejas de letras tomadas del conjunto de ocho letras del eje de grises.

El interés fundamental de Ostwald era la armonía del color y propuso una relación que establecía que la suma de los tres componentes: tono, blanco y negro era la unidad. Parece ser que esta relación fue de utilidad en la enseñanza en las escuelas de Arte de principios del siglo XX. Según su modelo, los colores saturados aparecen más brillantes cuando se combinan con blanco o con negro, pero los colores apagados armonizan mejor con los tonos de gris representados por los tonos de gris presentes en el color en cuestión.

Su uso en aplicaciones técnicas ha sido muy reducido, tanto en el pasado como en la

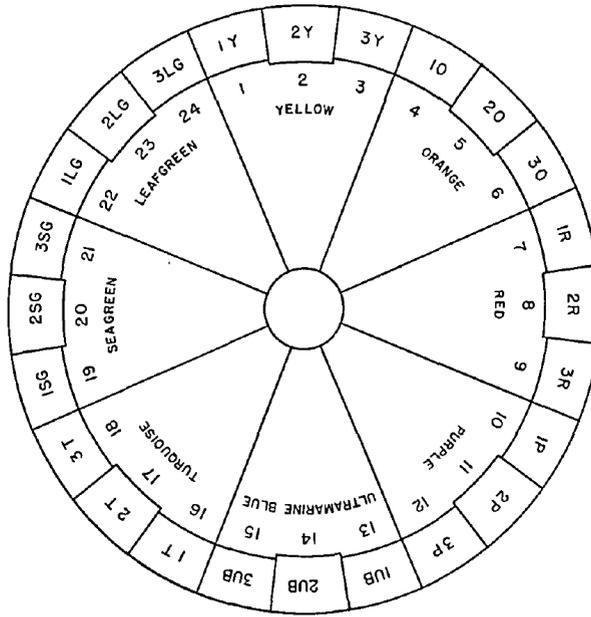


Figura 1.18: Círculo cromático de Ostwald



Figura 1.19: Sólido de color de Ostwald

actualidad. Uno de los fundadores de la Colorimetría moderna, J. Guild, estudió el sistema Ostwald y concluyó que no era posible usarlo en aplicaciones colorimétricas (Bond and Nickerson, 1942), algunos autores han sugerido incluso que su sistema basado en porcentajes de blanco, negro y tono se debe a un error en la interpretación de los trabajos de Von Helmholtz (Kuehni, 2003).

Sistema Munsell

El sistema de A. H. Munsell (1858-1918) es probablemente el sistema de ordenación del color más estudiado y más utilizado en todo tipo de aplicaciones. Es además el sistema oficial para la asignación de color a los suelos desde la década de 1930 y por ello su descripción es especialmente importante en esta tesis.

El sistema Munsell descompone el color en tono (*hue*), valor (*value*) y croma (*chroma*), abreviado como HVC o HV/C, en un sólido de aspecto irregular (Figura 1.21). El término valor, ambiguo en ciertas ocasiones, es equivalente al concepto de luminancia o luminosidad en otros espacios de color. Aunque inicialmente el propio Munsell consideró todos estos conceptos equivalentes, hoy en día se distinguen de manera precisa y no se pueden considerar sinónimos (Capítulo 2).

Munsell era pintor y profesor de arte. Se dice que comenzó a trabajar en un sistema de ordenación de color cuando fue incapaz de reproducir los colores de una puesta de sol. En 1901 desarrolló un fotómetro y una escala asociada para medir la luminosidad de los colores, y ya desde el primer momento designó esta magnitud con el nombre de valor.

La escala de valor se numeró de manera que la reflectancia, es decir la proporción de radiación reflejada por una superficie con respecto a la radiación incidente, se correspondiera con el cuadrado del número que identifica cada paso de la escala de grises. El negro se representa con 0 y el blanco con 10. Este hecho responde de nuevo a una interpretación de la ley de Stevens al igual que en el sistema Ostwald. Ambos llegaron a aplicar este principio de manera independiente, aunque parece ser que Munsell se adelantó unos años a Ostwald (Bond and Nickerson, 1942).

El primer sólido que probó fue una esfera, influenciado claramente por el modelo

esférico de Runge, con colores negros en la parte inferior, colores claros en la parte superior y el resto de colores repartidos entre estas dos zonas. No ordenó los colores de manera sistemática, por ejemplo poniendo los colores saturados en el ecuador como en el sólido de Ostwald. El nombre que Munsell dió a la saturación fue *chroma*.

Asociado a la escala de grises diseñó un círculo de tonos, con 5 tonos principales y otros 5 tonos intermedios. Munsell creó deliberadamente un sistema “decimal” de color con una escala de grises de 10 pasos y un círculo de tonos de 10 sectores. Los tonos principales se repartieron uniformemente sobre el círculo de tonos. La combinación de estos tonos en proporciones iguales sobre un disco giratorio debía producir un color gris.

La esfera inicial se transformó pronto en un sólido irregular (Figura 1.21) debido a cuestiones tecnológicas que impedían reproducir todos los colores y a evidencias observacionales que indicaban que la saturación máxima de los colores varían para cada tono y además se alcanzan en niveles de valor distintos. Se sabe que Ostwald y Munsell se conocieron en 1905 (Bond and Nickerson, 1942), momento en el que todavía utilizaba la esfera como sólido de color.

Munsell dejó poco material publicado. La fuente más fiable es su diario donde describió toda la evolución del sistema de color a partir de 1900. Una de las cuestiones de diseño de su sistema fue la adopción de las tres dimensiones del color que han permanecido hasta la actualidad y que definió como sigue:

- Hue (tono): la cualidad o aspecto del color asociada a las diferentes zonas del espectro.
- Value (Valor): el grado de luminosidad u oscuridad de un color.
- Chroma (croma): ausencia de gris, palidez (*dullness*), o grado de separación de un color respecto de un gris del mismo valor.

En 1920, con posterioridad a la muerte de Munsell, se realizó un estudio riguroso del sistema Munsell por parte del *National Bureau of Standards* (NBS) con las siguientes propuestas para su mejora:

1. La escala del valor se debía modificar para convertirla en un estándar
2. Los colores se debían especificar mediante mediciones físicas

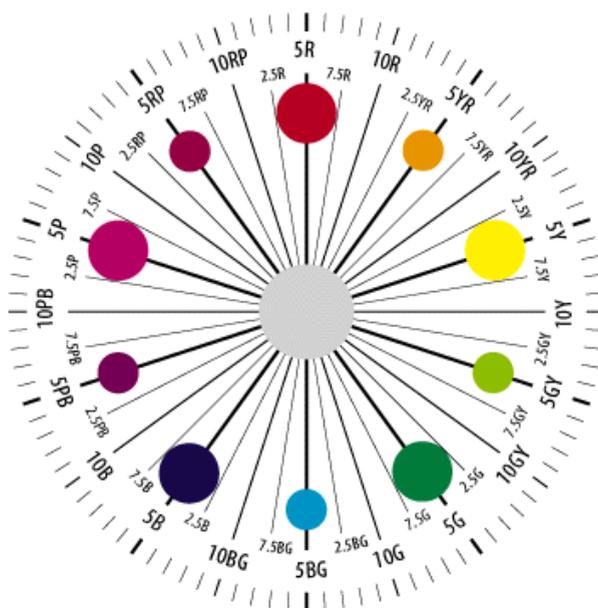


Figura 1.20: Círculo de color de Munsell

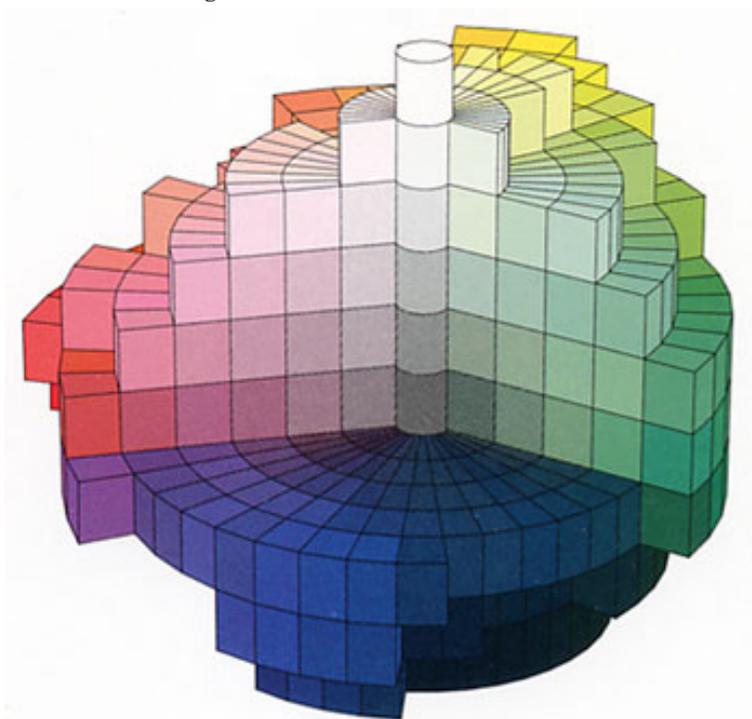


Figura 1.21: Sólido de color de Munsell

3. El libro de color debía ir acompañado por especificaciones fotométricas y colorimétricas
4. Las mediciones del valor se debían realizar con un blanco estándar
5. La nomenclatura debía ser revisada en posteriores ediciones

La compañía que fundó Munsell, llamada *Munsell Research Laboratory*, aceptó estas recomendaciones y en colaboración con el NBS publicó una nueva edición del atlas de color en 1929, que en esta ocasión denominaron *The Munsell Book of Color*. Esta edición modificó los pasos de la escala de grises y aumentó el número de tonos a 20.

La edición del libro de color Munsell de 1929 ya está presentada en la forma conocida actualmente. En la página web de Hathi Trust existe una reproducción digital de esa edición (Figura 1.22). Es interesante comparar las colecciones de fichas de color de la edición de 1929 con alguna de las ediciones modernas y sobre todo con la tabla Munsell de suelos (Figuras 1.26 y 1.27) para apreciar la evolución en cuanto a los materiales y la representación de los colores. Un aspecto que llama la atención es la distinta nomenclatura del tono utilizada en la edición de 1929, donde la notación YR-Y es equivalente a 10YR en las cartas de suelos actuales.

Especificación de colores

El círculo de tonos Munsell tiene 5 tonos principales R (rojo), Y (amarillo), G (verde), B (azul), P (púrpura) y cinco tonos intermedios YR (amarillo-rojo), GY (verde-amarillo), BG (azul-verde), PB (púrpura-azul), RP (rojo-púrpura). Estos son los 10 tonos fundamentales del círculo Munsell. Para poder discriminar un mayor número de tonos el círculo se divide en 40 sectores que determinan tonos expresados por una notación alfanumérica en la que cada paso de tono se corresponde angularmente a 10 grados centesimales. Por ejemplo la secuencia de tonos desde el rojo al amarillo es 5R, 7.5R, 10R, 2.5YR, 5YR, 7.5YR, 10YR, 2.5Y, 5Y, donde 5R es el rojo y 5Y es el amarillo (Figura 1.20). Asimismo, en la parte externa del círculo se observa una división más detallada de 100 sectores que determinan lo que podríamos denominar la unidad de tono Munsell. Cada una de estas

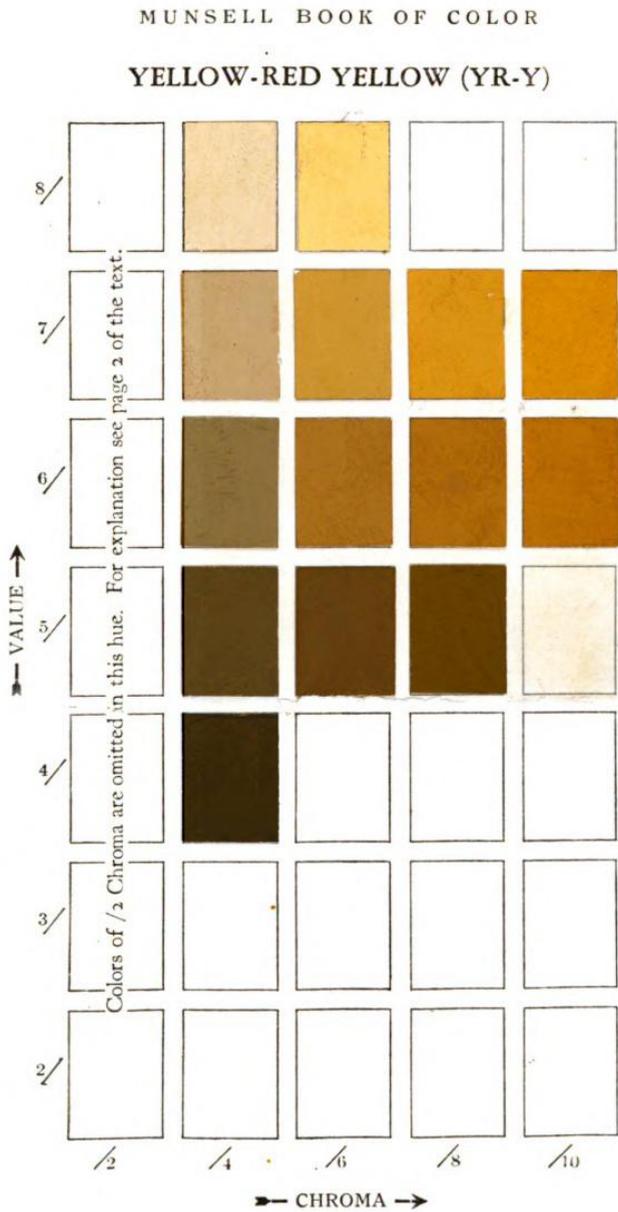


Figura 1.22: Hoja YR-R del libro Munsell de 1929

unidades tiene una amplitud de 4 grados centesimales y por tanto un paso de tono está formado por 2.5 unidades de tono Munsell.

La notación Munsell para la dimensión tono tiene una correspondencia numérica que se especificó desde la edición de 1929 (Figura 1.23). En el caso de las tablas de color del suelo la única escala utilizable es la alfanumérica, pero en el Capítulo 4 aparece una aplicación donde es necesario el uso de la notación numérica.

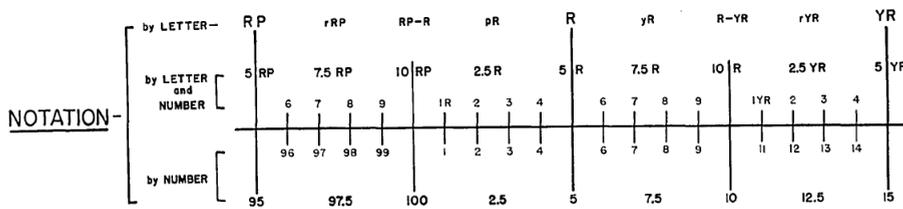


Figura 1.23: Notación Munsell y su correspondencia numérica

El sistema Munsell permite representar los colores que tienen el mismo valor mediante un plano horizontal en el espacio. Asimismo, representa colores con el mismo tono en planos verticales y colores con mismo croma en círculos concéntricos respecto del eje de grises. La representación está basada en el sólido irregular con una ordenación de colores en pasos uniformes de tono, valor y croma. Esta característica constituye una diferencia fundamental con respecto al sólido de Ostwald. En el caso del sistema Munsell, los nuevos colores que van apareciendo a medida que la tecnología del color crea nuevos pigmentos con mayor croma pueden ser incluidos en el sólido de manera inmediata. Simplemente hay que situarlo en la parte externa del sólido. En el caso del sistema de Ostwald los nuevos pigmentos obligan a modificar todo el sólido para poder alojar el nuevo pigmento. En la década de 1930 esta cuestión era importante y de hecho ya se sabía que los pigmentos existentes en la zona de los rojos y amarillos estaban en el límite de los colores reproducibles con pigmentos, pero también se sabía que la zona de los verdes, azules y púrpuras todavía estaba lejos de los límites teóricos que indicaban los estudios de eficiencia visual de colorantes (Bond and Nickerson, 1942). Este es el motivo por el cual las hojas del libro Munsell que más cambios han sufrido desde aquella época son precisamente las correspondientes al verde, azul y púrpura.

La notación Munsell consiste en una cadena alfanumérica donde se indica en primer lugar el tono, seguido por la fracción entre el valor y el croma en este orden, o en forma compacta H V/C. El símbolo de fracción no indica división matemática, sino simplemente una separación de campos.

La especificación de un color en el sistema Munsell se completa con una descripción textual de la notación alfanumérica. Por ejemplo, el color 10YR6/3 se denomina marrón claro (*pale brown*), tal y como se observa en las Figuras 1.26 y 1.27.

En 1938 el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) publicó gráficos provisionales de isolíneas de croma en el espacio Munsell con la intención de evaluar su uso en la descripción de perfiles de suelo (Bond and Nickerson, 1942; Simonson, 1993). El sistema fue aceptado y desde aquella época los colores de los suelos se expresan según esta notación tal y como se establece en los manuales de levantamientos y clasificación de suelos (Soil Survey Division Staff, 1993; Soil Survey Staff, 2010b).

La comparación entre los sistemas Ostwald y Munsell, coincidentes en el tiempo, indica que el sistema Munsell es mejor para la especificación de colores, mientras que el sistema Ostwald es mejor para estudiar la armonía de las combinaciones de colores. Las tres principales ventajas son (Bond and Nickerson, 1942):

1. Las tres dimensiones del sistema Munsell tienen una correspondencia clara con los conceptos psicofísicos del color típicos de la Psicología y de la Colorimetría. Como consecuencia, el sistema Munsell permite identificar los colores de manera más rápida.
2. Los límites del sólido de Ostwald no son fijos. La aparición de nuevos colores obliga a modificar el propio sólido.
3. Algunos colores no tienen notación en el sistema de Ostwald.

En esta sección dedicada a los sistemas de ordenación de color es conveniente incluir una nota sobre el uso de estos atlas o libros de color, el cual está sujeto a indeterminaciones que provienen principalmente del deterioro de las fichas a lo largo del tiempo y de las limitaciones en la reproducción exacta de los tonos. Es lo que algunos autores han denominado la fragilidad de los atlas de color (Kuehni, 2003). En lo referente al tratamiento automático de los datos de color, esta es la principal desventaja de los sistemas de orde-

nación de color frente a los procedimientos basados en los espacios de color CIE (Capítulo 2).

A lo largo del tiempo el sistema Munsell ha sufrido varias modificaciones conocidas como re-notaciones o re-renotaciones. La primera de ellas se realizó en 1948 y la segunda en 1967. Las renotaciones se realizan para adaptar el sistema Munsell a las nuevas evidencias experimentales que van apareciendo a lo largo del tiempo. La modificación de 1967 se realizó únicamente para modificar las fichas con valor 6/.

Una cuestión histórica sobre la aceptación del sistema Munsell en la Ciencia del Suelo probablemente está relacionada con D. Nickerson y su papel fundamental en el desarrollo del sistema. Ella siempre fué defensora del sistema Munsell y participó activamente en su desarrollo e implantación (Bond and Nickerson, 1942; Judd and Nickerson, 1967; Nickerson, 1976; Landa and Fairchild, 2005). Es interesante saber que gran parte de su carrera profesional se desarrolló en el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) que fue la institución que finalmente adoptó el sistema Munsell para sus determinaciones del color del suelo (Simonson, 1993). No resulta difícil pensar en la influencia que debió ejercer Nickerson en la adopción del sistema Munsell.

1.5 El color del suelo

La última sección de este capítulo trata una de las cuestiones principales de esta tesis: la medida del color del suelo y su interés desde el punto de vista Agrícola. El color es una de las propiedades más evidentes del suelo. Se trata de una característica intrínseca del suelo, en tanto que es consecuencia de la propia génesis del suelo y no de un agente externo que afecta a su comportamiento (Cook, 2008).

Es evidente que el suelo es uno de los factores biogeográficos con mayor influencia en el desarrollo de la humanidad y en la distribución de las distintas sociedades y grupos de población (Winiwarter, 2010; Beck and Sieber, 2010). Además de ser el soporte para la producción de alimentos y fibras a través de la Agricultura, el suelo desempeña otros papeles medioambientales importantes. Interviene activamente en el ciclo del agua, sirve de filtro en el intercambio de gases entre los sistemas atmosférico y terrestre y es el hábitat

para las plantas y para multitud de organismos. También ofrece soporte a la construcción de obras de ingeniería y es una fuente de extracción de materiales de construcción.

El suelo puede ser considerado igualmente como un patrimonio cultural. En él descansan los restos arqueológicos o paleontológicos, entre los cuales se encuentran las primeras expresiones escritas en tablillas de arcilla moldeada en una antigua forma de escritura conocida como cuneiforme (Hillel, 2006).

Las distintas sociedades han aprendido a utilizar el recurso suelo, en algunas ocasiones produciendo suelos más fértiles que en su estado original y en otras ocasiones degradándolo, en cuyo caso se habla del fenómeno de degradación antropogénica. Los daños más importantes inducidos por la acción humana desde el punto de vista agrícola son la erosión, la salinización y el agotamiento de nutrientes. Estas modificaciones del entorno comenzaron a producirse de manera generalizada por primera vez en las últimas etapas del periodo neolítico con el nacimiento de la agricultura de roza y quema. Esta práctica cultural, todavía presente en algunas zonas del planeta, consiste en la eliminación de la vegetación natural de una zona determinada, la quema de los restos vegetales y el subsiguiente cultivo durante un periodo que depende de la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Una vez agotados los nutrientes la zona es abandonada y comienza un periodo de recuperación de la vegetación natural. Esta primitiva agricultura basada en la acción regeneradora del fuego repetida cíclicamente, se considera precursora del nacimiento de la agricultura, la ganadería, el sedentarismo y para algunos autores también la civilización (Hillel, 2006), aunque esta última cuestión no está universalmente aceptada (Diamond, 1987).

El suelo está presente en la cultura de muchas comunidades. La aparición en refranes, dichos y otros elementos de la tradición oral es generalizada, teniendo además un carácter intercultural. Araya (2003) realizó un estudio donde recopiló unos 60 proverbios en los cuales el suelo o la tierra eran el objeto principal. Los proverbios se dividieron en cuatro categorías: el suelo como final de la vida, el suelo como referente universal, el valor del suelo y el deber de cuidar del suelo. Uno de los dichos más paradigmáticos es “El suelo negro produce pan blanco”, de origen noruego y en cuyo enunciado aparece curiosamente

el color del suelo.

Existen zonas en España como la comarca de la Ribagorza de Huesca, donde existen una serie de poblaciones denominadas los pueblos *royos*, llamados así por el tono rojizo de sus construcciones hechas a base de arenisca roja. Las denominaciones pueblos rojos, pueblos negros y otras derivadas del color de los materiales de construcción son frecuentes también en algunas provincias en cuyos cascos urbanos se utilizaron la pizarra, los esquistos o las cuarcitas como materiales de construcción.

Aunque muchas sociedades de la era preindustrial aprendieron a clasificar el suelo, así como a determinar su fertilidad o mejorar su utilidad a partir de diversas prácticas culturales (Winiwarter, 2010), hasta el siglo XIX no se puede hablar de un interés científico por el suelo. En la actualidad existen dos sistemas de clasificación de suelos propuestos por la FAO (FAO, 2006) y por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) (Soil Survey Staff, 2010c). En el caso de la Soil Taxonomy los suelos se clasifican en 12 órdenes que agrupan diversos taxas como subórdenes, grandes grupos, subgrupos y familias en una estructura jerárquica. Este será el sistema de clasificación que usaremos al citar tipos de suelo en el presente trabajo.

Los doce órdenes de suelos son: Alfisoles, Andisoles, Aridisoles, Entisoles, Gelisoles, Histosoles, Inceptisoles, Mollisoles, Oxisoles, Spodosoles, Ultisoles y Vertisoles. En nuestra zona de trabajo se encuentran representados los órdenes Aridisoles y Entisoles.

Un suelo ideal consiste aproximadamente en un 50% de poros, ocupados por aire o por agua, un 45% de partículas minerales y un 5% de materia orgánica. La humedad, la fracción mineral y la materia orgánica (especialmente la materia orgánica en forma de humus) son elementos que determinan el color del suelo, como se verá más adelante. La granulometría de la fracción mineral, expresada en porcentajes de arena, limo y arcilla, es un elemento definitorio de un suelo. El conjunto de estos tres porcentajes se conoce como textura del suelo en la terminología edafológica. Los suelos se pueden agrupar según su textura mediante el triángulo de textura del suelo (Figura 1.24).

En ocasiones no es fácil distinguir los límites del elemento suelo. En general se acepta que el suelo se extiende a las zonas donde existe actividad biológica. El criterio usado

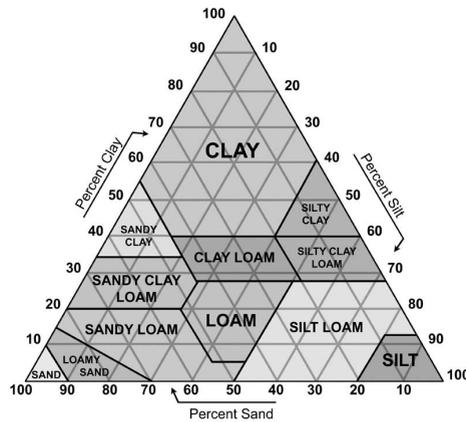


Figura 1.24: Triángulo de texturas (USDA)

en la Taxonomía de Suelos es considerar una profundidad máxima de dos metros, incluso si la profundidad de suelo que alberga actividad biológica o procesos pedogenéticos es mayor (Soil Survey Staff, 2010c).

Una primera aproximación para clasificar los suelos consiste en dividirlos en dos grandes conjuntos: suelos minerales y suelos orgánicos. Los suelos minerales son más abundantes e incluyen todos los suelos excepto el suborden Histels (pertenecientes a los Gelisoles) y el orden Histosols. En el orden de los Andisoles (suelos volcánicos) puede haber gran cantidad de materia orgánica, lo cual podría llevar a clasificarlos como suelos orgánicos. Sin embargo, la fracción mineral tiene mayor control sobre las características y propiedades del suelo, por lo cual se incluyen en el orden Andisols.

Existen definiciones específicas en forma de clave para determinar rigurosamente si un suelo es mineral u orgánico (Soil Survey Staff, 2010b). En dicha clave se especifica una regla general para identificar suelos orgánicos que se indica a continuación en su forma original:

“It is a general rule that a soil is classified as an organic soil (Histosol or Histel) if more than half of the upper 80 cm (32 in) of the soil is organic or if organic soil material of any thickness rests on rock or on fragmental material having interstices filled with organic materials”

Tabla 1.1: Designación de horizontes (FAO, 2006)

Horizonte	Descripción básica
O	Horizonte formado por material orgánico parcialmente o totalmente descompuesto que no está saturado durante largos periodos de tiempo
A	Horizonte mineral situado en superficie o por debajo de un horizonte O en el cual la estructura de la roca original ha sido totalmente alterada
E	Horizonte mineral cuya característica más destacada es la pérdida de arcilla, hierro, aluminio o cualquier combinación de ellos, lo cual resulta en altos concentraciones de partículas de arena y limo
B	Horizonte subsuperficial situado bajo un horizonte A, E, O o H caracterizado por la alteración de la roca original
C	Horizonte subsuperficial poco o nada afectado por procesos pedogénéticos y que no presenta las características de los horizontes H, O, A, E o B
R	Horizonte formado por la roca madre situada bajo el suelo.

Una de las características que diferencian los suelos de otras formaciones geológicas es su anisotropía, la cual se manifiesta en una diferenciación vertical en forma de capas de distinto color, textura y material, denominadas horizontes. La descripción de horizontes, capas en las cuales se diferencia el perfil del suelo, es una tarea fundamental en la clasificación de suelos. Existe una nomenclatura para designar los distintos horizontes de un suelo que se resumen en la Tabla 1.1. En la tabla sólo aparece la característica más destacada de cada tipo de horizonte. Los horizontes genéticos se designan con una de las letras O, A, E, B, C y R. En ocasiones las letras mayúsculas van acompañadas por letras minúsculas que indican alguna característica importante del horizonte y por números que permiten subdividir horizontes. Los detalles para la designación están en la bibliografía (FAO, 2006).

La Taxonomía de Suelos establece una serie de horizontes y características de diagnóstico aplicables a suelos minerales y orgánicos. Se distingue entre horizontes superficiales o epipediones y horizontes subsuperficiales o endopediones. Los tipos de epipedión que puede presentar un suelo son antrópico, folístico, hístico, melánico, móllico, óchrico, plaggen y úmbrico.

Es interesante destacar que en seis de los ocho tipos de epipedión (antrópico, melánico,

móllico, óchrico, plaggen y úmbrico) existen referencias al color como característica de diagnóstico (Soil Survey Staff, 2010b).

En este trabajo se ha procesado un conjunto de muestras procedentes de horizontes superficiales (*topsoil*) de suelos pertenecientes a los órdenes Aridisoles y Entisoles. En términos edafológicos estos dos órdenes de suelos se consideran suelos jóvenes y poco desarrollados debido fundamentalmente a la baja disponibilidad de humedad durante su génesis. Los suelos pertenecientes a estos dos órdenes pueden presentar epipediones óchricos o antrópicos (en raras ocasiones los Entisoles pueden presentar otro tipo de epipedión). A continuación se presentan de manera muy breve las características distintivas de estos dos epipediones, típicos de nuestros suelos. La descripción completa está en la bibliografía (Soil Survey Staff, 2010b).

El epipedión antrópico es un horizonte mineral que presenta algún tipo de evidencia de intervención humana. La tercera característica que debe cumplir el epipedión antrópico especifica los siguientes items (Soil Survey Staff, 2010b):

3. *One of the following:*

a. *Both of the following:*

(1) *Dominant colors with a value of 3 or less, moist, and of 5 or less, dry; and*

(2) *Dominant colors with chroma of 3 or less, moist; or*

b. *A fine-earth fraction that has a calcium carbonate equivalent of 15 to 40 percent and colors with value and chroma of 3 or less, moist; or*

c. *A fine-earth fraction that has a calcium carbonate equivalent of 40 percent or more and a color value, moist, of 5 or less*

Esta característica forma parte de una lista de siete características requeridas para que un epipedión sea antrópico. Las otras características incluyen aspectos como la estructura, contenido de carbono orgánico, grosor o el contenido en fosfatos.

El epipedión óchrico se determina por eliminación al no cumplir ninguna de las características de los otros siete tipos de epipedión. Entre estas características está el color, cuyos niveles de valor (brillo) o croma son mayores que en los otros epipediones. La mayoría de epipediones óchricos presentan niveles de valor Munsell superiores a 4 en condiciones húmedas o superiores a 6 en seco, o niveles de croma superiores a 4.

Los horizontes subsuperficiales también cuentan entre sus características requeridas algunas referentes al color. En el contexto de este trabajo los horizontes subsuperficiales no tienen tanto interés como los horizontes superficiales debido a que las muestras analizadas proceden de horizontes superficiales o *topsoil*. La información referente a los horizontes subsuperficiales se localiza fácilmente en la bibliografía (Soil Survey Staff, 2010b).

A pesar de la importancia del suelo para la Agricultura y el Medio Ambiente, no existe una definición aceptada universalmente del concepto Suelo. Jenny (1941) comparó varias definiciones procedentes de diversos autores y propuso la siguiente definición:

“El suelo es el medio donde las plantas encuentran su soporte mecánico, el alimento y otras condiciones necesarias para su crecimiento”

El *Soil Survey Manual* (SSM) (Soil Survey Division Staff, 1993) propone una definición mucho más larga presentada en el texto como el “concepto moderno de suelo”:

Soil is “the collection of natural bodies in the earth’s [sic] surface, in places modified or even made by man of earthy materials, containing living matter and supporting or capable of supporting plants out-of-doors. Its upper limit is air or shallow water. At its margins it grades to deep water or to barren areas of rock or ice. Its lower limit to the not-soil beneath is perhaps the most difficult to define. Soil includes the horizons near the surface that differ from the underlying rock material as a result of interactions, through time, of climate, living organisms, parent materials, and relief. In the few places where it contains thin cemented horizons that are impermeable to roots, soil is as deep as the deepest horizon. More commonly soil grades at its lower margin to hard rock or to earthy materials virtually devoid of roots, animals, or marks of other biologic activity. The lower limit of soil, therefore, is normally the lower limit of biologic activity, which generally coincides with the common rooting depth of native perennial plants”

Independientemente de la definición y de la disciplina de estudio, el suelo es el resultado de la acción de una serie de procesos denominados factores formadores. El enfoque

clásico representa la acción de los factores formadores en forma de ecuación (Jenny, 1941):

$$s = f(cl, o, r, p, t)$$

donde los factores formadores son: clima (*cl*), organismos (*o*), topografía (*r*), material parental (*p*) y tiempo (*t*). Las complejas interacciones entre estos factores dan como resultado lo que conocemos como suelo (*s*). Se observa que los factores formadores introducidos por Jenny en 1941 están presentes en la anterior definición del “concepto moderno de suelo” del USDA.

El proceso formador más importante desde el punto de vista del color del suelo es el material parental. En los horizontes superficiales (*topsoil*) el color está influenciado también por el contenido y tipo de materia orgánica, la cual produce en general colores más oscuros. En este sentido hay que destacar que la cantidad de materia orgánica no es el parámetro determinante, sino que el grado de humificación, más o menos intenso, es el que produce colores más oscuros (Thwaites, 2006).

La combinación de otros factores, por ejemplo el tiempo y el clima cuyo resultado combinado son los procesos de meteorización, pueden asimismo influir en el color del suelo. Está bien documentado mediante simulaciones de laboratorio que la alteración de la fracción de arena produce materiales con colores más enrojecidos (Williams and Yaalon, 1977).

A nivel de sustancias o compuestos químicos que pueden influir en el color del suelo hay que destacar tres: los compuestos de hierro que actúan sobre el tono y el croma (rojo), la materia orgánica que actúa fundamentalmente sobre la claridad (negro) y los carbonatos, caolinita y ácido silícico que también actúan sobre la claridad (blanco).

En el caso particular de la materia orgánica y el contenido en carbonatos y sales, hay que tener en cuenta que además de la luminosidad, también pueden afectar al croma e incluso en menor medida al tono. El efecto sobre el croma da como resultado colores menos saturados.

Esta correspondencia entre sustancias químicas y color del suelo se ha considerado desde los primeros días de la Ciencia del Suelo y de hecho existe un diagrama triangular

(Figura 1.25) para ordenar los colores del suelo en función de los atributos cromáticos asociados a los contenidos de estas tres sustancias que fue propuesto por Zakharov en 1927 (Simonson, 1993). En los vértices se sitúan los atributos básicos blanco, negro y rojo, a partir de los cuales se organizan todos los colores de suelos.

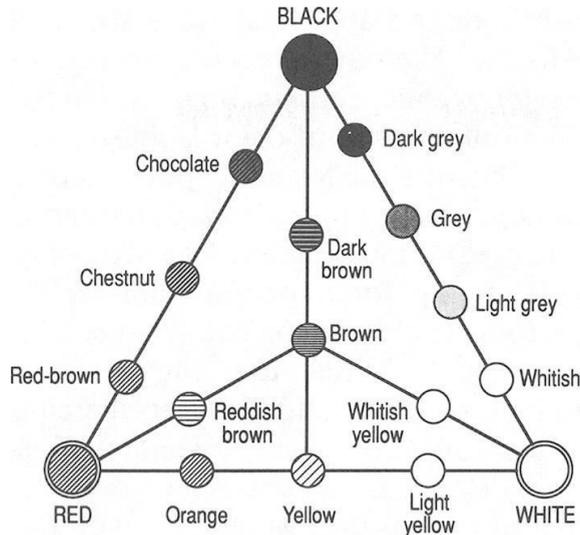


Figura 1.25: Triángulo de color de Zakharov

Los compuestos químicos que probablemente aportan mayor contenido cromático a los suelos son los sesquióxidos de hierro (Simonson, 1993; Ovalles-Viani, 2003). El tipo de óxidos puede producir suelos rojos, pardos o amarillos. La goetita es el óxido de hierro más común y produce suelos rojizos, pardos y amarillentos en función de su grado de hidratación. La hematita (Fe_2O_3) produce colores rojos. Otros óxidos de hierro menos abundantes son la lepidocrocita que proporciona suelos amarillos y naranjas según existan condiciones anaeróbicas o aeróbicas respectivamente. La ferrihidrita produce colores rojos en condiciones anaeróbicas (horizontes Bs, Bhs). La maghemita es un óxido de hierro transformado por la acción del fuego que produce colores que están entre los rojos de la hematita y marrones y amarillentos de la goetita.

En horizontes profundos los colores de los óxidos de hierro puede ser muy diferentes debido al alto contenido de humedad, que a menudo produce condiciones de saturación.

En estas condiciones la jarosita ($KFe_3(OH)_6(SO_4)_2$) produce un moteado amarillo en suelos ácidos. En horizontes saturados la coloración de la matriz del suelo se vuelve entre gris y verdosa debido a la reducción del hierro por la acción microbiana. La coloración verde también es debida a la presencia de sales de hierro Fe^{3+} y Fe^{2+} .

Medición del color del suelo

Las medidas de color del suelo se realizan en campo o en laboratorio (Soil Survey Division Staff, 1993; Torrent and Barrón, 1993), siendo las observaciones de campo menos precisas que las medidas de laboratorio. Las medidas de campo se suelen realizar en el momento de extraer la muestra, con el grado de humedad saturada. Las medidas de laboratorio, en cambio, se suelen realizar con las muestras alteradas lo cual evita indeterminaciones en la asignación del color.

Las condiciones de observación de las muestras de suelo suponen un factor fundamental para realizar mediciones precisas. En este sentido es especialmente importante prestar atención al contenido de humedad de la muestra y a la iluminación ambiental. Es bien conocido que un mayor contenido de humedad produce colores más oscuros en las muestras de suelo, es decir con un brillo menor, y de hecho este parámetro se puede estudiar a partir de medidas de la luminosidad del suelo (Sánchez-Marañón et al., 2007).

La iluminación ambiental puede producir efectos más importantes en los colores percibidos. El hecho de observar una misma muestra con distintas alturas del sol produce por sí mismo un cambio en la luminosidad observada, por ello el SSM recomienda que las observaciones de campo se realicen al mediodía solar o bien en laboratorio si esto no es posible (Soil Survey Division Staff, 1993). Sin embargo, la luz natural también puede tener efecto sobre el tono de la muestra. Este problema es mucho más difícil de resolver y está causado por la propia composición espectral de la luz solar a distintas elevaciones solares. Estas distintas elevaciones producen luz de “distinto” color que interaccionan con la muestra dando como resultado una diferencia en el tono observado.

Estrictamente hablando, el color asignado a una muestra de suelo es aquel que ocupa más del 50% del volumen o matriz del suelo. En caso contrario sería necesario determinar

todos los colores predominantes. En este sentido la preparación de la muestra es importante. Las preparaciones de laboratorio permiten homogeneizar el color de la muestra observada, mientras que en observaciones de campo o sobre agregados puede ser necesaria la determinación de varios colores para una única muestra. Tal y como se describirá en el Capítulo 4, en este trabajo se han utilizado muestras preparadas en laboratorio, homogeneizadas y tamizadas en un tamiz de 2 mm de malla, por lo cual consideramos un único color por muestra.

El color del suelo se puede asociar con algunas características intrínsecas del mismo (Ovalles-Viani, 2003; Thwaites, 2006). Entre estos atributos están el grado de evolución, el contenido de humus, el contenido de minerales o la productividad del suelo. Asimismo, el color también aporta información sobre el contenido de sales o el drenaje, ambos parámetros relacionados con la productividad y potencialidad agrícola del suelo.

El sistema clásico de asignación de colores al suelo se basa en el uso de tablas o cartas de color Munsell específicas para suelos (Munsell Color, 1994). La carta de color Munsell para suelos es una versión reducida y ligeramente modificada del libro de color Munsell.

Anteriormente se indicó que el sistema de ordenación Munsell está configurado como un sólido tridimensional donde la información cromática se estructura en planos verticales de tono constante y en círculos concéntricos de croma constante, mientras que la información relativa a la luminosidad se representa sobre planos horizontales de valor constante (Figura 1.21).

La distribución radial de los tonos Munsell de la Figura 1.21 se materializa en distintas hojas de la tabla Munsell de suelos (Figuras 1.26 y 1.27). Esta distribución de tonos puede ser expresada numéricamente mediante un sistema de coordenadas radial, en el cual cada tono se corresponde con un ángulo medido respecto de un origen convencional. El origen se toma en el tono 10RP (Figura 1.23) al cual se le asigna 0 (o 100), aumentando los ángulos en sentido dextrógiro.

Los colores de los suelos se localizan generalmente en los tonos 10R (rojos), 2.5YR, 5YR, 7.5YR, 10YR, 2.5Y y 5Y (amarillos). Los suelos blancos, negros o grises se designan con la letra N (neutro) indicando que se encuentran en la zona central del sólido o

zona acromática. En una primera aproximación, un suelo se considera rojo si su tono está situado desde el 10R hasta el 5YR (con cromas > 1) y amarillo si su tono está entre el 7.5YR y el 5Y. Se denominan suelos oscuros a aquellos suelos que presentan valores o brillos < 3 y cromas < 2 . Se han descrito algunos suelos que están fuera de este rango, por ejemplo suelos 5R en la zona central de Australia (Thwaites, 2006) y en algunas zonas de Brasil (Simonson, 1993). La humedad del suelo puede modificar la claridad hasta 3 unidades y el croma hasta 2 unidades.

Algunas combinaciones de colores pueden complicar considerablemente la asignación de un color de suelo a una muestra dada. Estas combinaciones se presentan en forma de moteados, patrones o cuando aparecen nódulos en la muestra. Los moteados se asocian a procesos o condiciones ambientales que no tienen relación con los minerales constituyentes del suelo. Las características redoximórficas constituyen el factor más importante para la presencia de moteados.

Los patrones tienen una relación mucho más clara con la composición química del suelo y la presencia de nódulos puede ser debida a procesos de génesis del suelo o incluso a las condiciones de uso y manejo (Ovalles-Viani, 2003).

El SSM (Soil Survey Division Staff, 1993) recomienda realizar la medida del color en el exterior, con luz natural y en las horas cercanas al mediodía. Si estas condiciones no se pueden cumplir se deben tomar muestras para ser observadas posteriormente. Asimismo, el SSM recomienda la medida de color en condiciones de suelo seco y húmedo, especificando las condiciones físicas de la muestra. Las muestras estudiadas se pueden presentar en forma alterada o inalterada. Hay dos situaciones en las cuales es posible estudiar muestras inalteradas. Una primera opción es examinar la muestra de suelo en la posición y condiciones originales que existían en campo. Una segunda opción es usar anillos especiales para extraer la muestra inalterada y transportarla al laboratorio. Cualquier otro tipo de procesamiento supone la alteración de la muestra. La extracción de agregados representa una alteración mínima, mientras que la trituración o la dispersión producen la alteración máxima.

El resultado final de la medida del color del suelo se plasma en dos descriptores:

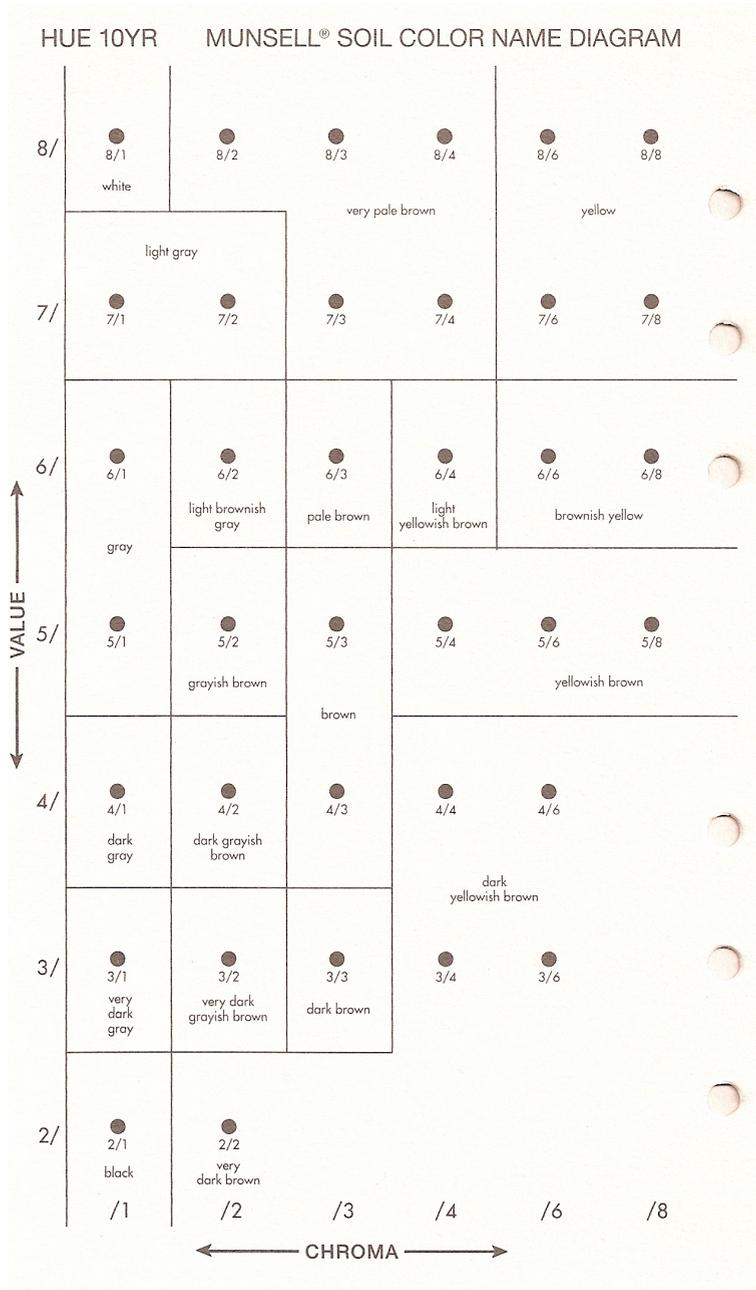


Figura 1.26: Tabla Munsell de suelos: denominación de colores

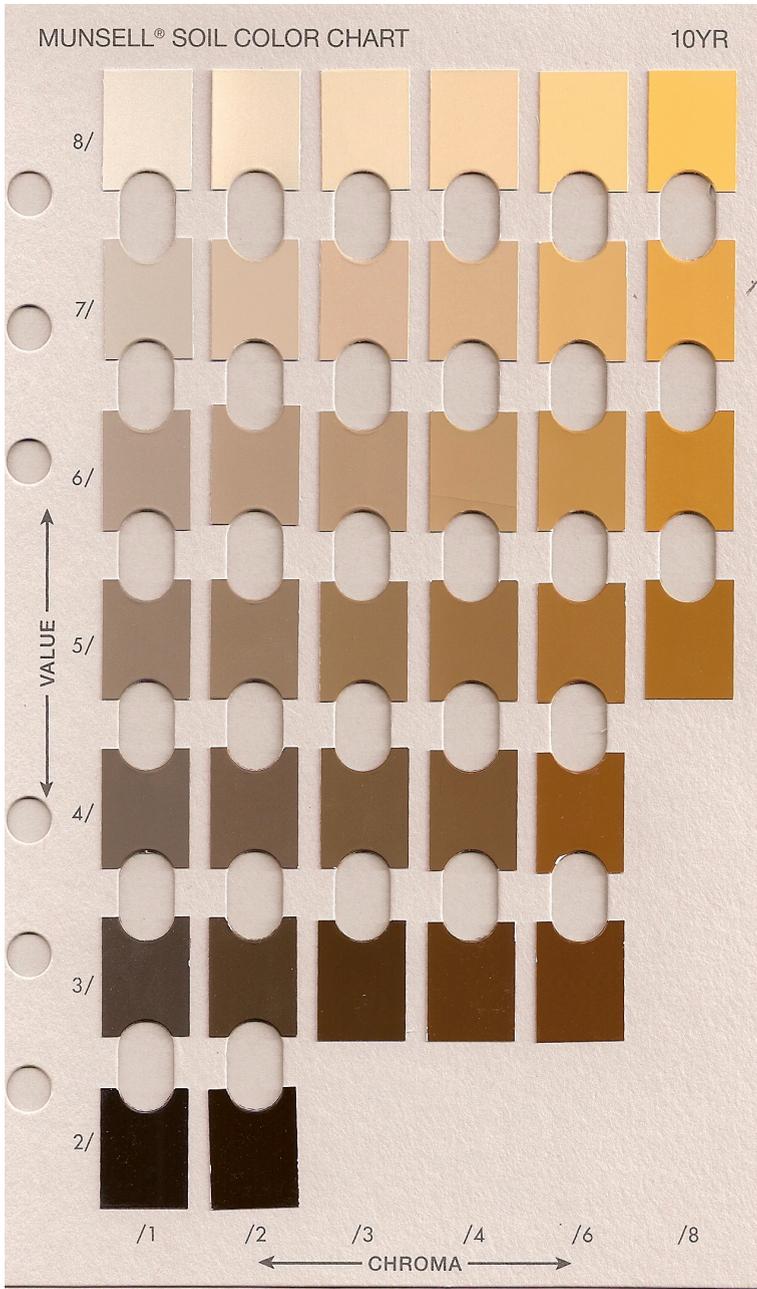


Figura 1.27: Tabla Munsell de suelos: fichas de color

la notación Munsell y la descripción del color Munsell. La notación Munsell ha sido descrita anteriormente y consta de una combinación de números y letras. La descripción del color consiste en una definición corta que va asociada a cada etiqueta Munsell y que está presente en la carta de colores de suelos. En las Figuras 1.26 y 1.27 se observan las fichas y notaciones de color junto a las designaciones de color correspondientes del tono 10YR. Por ejemplo la notación 10YR 4/6 corresponde al color marrón amarillento oscuro.

Existen dos diferencias básicas entre la carta de suelos Munsell y el libro de color Munsell. La primera y más evidente es que la carta de colores del suelo es una versión reducida del libro, tal y como se comentó anteriormente. La segunda diferencia es la presencia de dos hojas denominadas *gley* que no existen como tal en el libro de color y que representan suelos desarrollados bajo condiciones hidromorfas y en zonas volcánicas. Las hojas de tonos *gley* se corresponden con algunos tonos 5Y, 5GY, 5G, 5BG y 5B correspondientes a los denominados suelos verdes. Existen otras diferencias prácticas como el tamaño de las cartas y la forma de las fichas de color, orientadas sobre todo a facilitar el trabajo de campo. Un detalle específico de estas cartas son las perforaciones presentes en el material de fondo de las cartas para facilitar la superposición de las mismas sobre la muestra de suelo.

El color también puede aportar información sobre el desarrollo del suelo. En este sentido existen índices de color basados en un concepto interesante denominado interacción de tono y croma (Buntley and Westin, 1965). La interacción entre tono y croma parece natural si pensamos en la propia definición de los dos componentes. El tono se define como el color espectral dominante y representa la “cualidad” que permite distinguir los colores. El croma se define como la desviación aparente de un color con respecto a su equivalente neutro, pero también se define en ocasiones como la pureza del tono. Esta última definición sugiere algún tipo de relación entre tono y croma. Otra característica que sugiere una relación es el hecho conocido que establece un valor de croma cero cuando el tono es cero, es decir, el croma debe ser nulo en colores neutros.

Los índices de color se calculan como funciones de las representaciones numéricas

Tabla 1.2: Equivalencia entre notaciones Munsell y la representación numérica en el índice B-W

+Rojo				+Amarillo			
7.5R	10R	2.5YR	5YR	7.5YR	10YR	2.5Y	5Y
8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0

del tono y del croma. El índice B-W (Buntley and Westin, 1965; Schaetzel and Anderson, 2005) se obtiene como el producto del croma por el tono y sus autores lo denominaron CDE (*color development equivalent*) destacando su uso en la determinación del grado de desarrollo del suelo. La equivalencia entre el tono Munsell y la representación numérica del tono que utilizaron se observa en la Tabla 1.2. En la secuencia numérica se asigna un valor numérico mayor al rojo puesto que dicho color indica mayor grado de desarrollo.

La determinación del color descrita en esta sección se basa en la observación directa de la muestra de suelo junto con las cartas de color. El observador asigna una notación basándose en la sensación visual que recibe en el momento de la observación. Un cambio en las condiciones de iluminación, del punto de observación o de otras condiciones de observación pueden modificar las características cromáticas percibidas por el observador. Este es claramente un punto débil de la metodología.

En este punto cabe preguntarse si el método de asignación es suficientemente preciso para las aplicaciones técnicas. Las referencias existentes en la bibliografía son escasas en cuanto a la bondad del método de asignación del color basado en cartas Munsell. Ovalles-Viani (2003) indica que las mediciones son reproducibles por dos observadores en un rango de 2.5 unidades de tono y una unidad de claridad y croma. También incluye datos procedentes de estudios previos y de la experiencia propia que se cifran en errores de hasta el 9% en la determinación del tono y del 4.5% en la determinación de la claridad.

Otro aspecto que influye en la exactitud y precisión de la determinación del color es la discrepancia entre los colores de las muestras y los colores de las fichas disponibles en el libro de color. Esto obliga a los usuarios a asignar colores cuantificando visualmente la “proximidad cromática” entre la muestra de suelo y la ficha de color más cercana. Thwaites (2006) apunta que incluso entre edafólogos muy experimentados la coincidencia

en la designación del color en sus tres componentes es del 50% sobre un conjunto de muestras de diversos colores. La coincidencia en cada uno de los componentes puede llegar hasta el 70%.

La valoración de los errores de asignación entre observadores y por cada observador se expondrá posteriormente. En cualquier caso pensamos que la precisión y exactitud en la determinación de los colores de los suelos pueden ser mejoradas mediante el uso de procedimientos de medida en laboratorio basados en los estándares CIE (Commission Internationale de l'Éclairage). El uso de estas metodologías también proporciona importantes ventajas añadidas como la automatización de ciertas partes del proceso de medida, la eliminación de errores de tratamiento con volúmenes de datos de cierto tamaño y la posibilidad de almacenar las mediciones en formato digital para su posterior tratamiento junto con otros conjuntos de datos en programas de aplicación especializados.

Las cuestiones relacionadas con la representación numérica de las notaciones Munsell y con la incertidumbre de las determinaciones de color con tablas Munsell han constituido la motivación principal para el desarrollo de este trabajo. Ambas cuestiones se retomarán en el Capítulo 4.

Capítulo 2

Colorimetría

2.1 Unidades, magnitudes y terminología

El *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) es la entidad internacional encargada de regular todas las acciones referidas a la medida de magnitudes físicas y químicas (BIPM, 2006). Fué fundada en París durante la sesión de clausura de la Convención del Metro de 1870. Algunas de sus funciones más importantes son el establecimiento de normas y escalas para la medida de cantidades físicas, la coordinación de técnicas de medida o la determinación de constantes físicas. También se encarga de la divulgación y mejora del Sistema Internacional de Unidades (SI) que es la versión actual del Sistema Métrico.

Inicialmente las actividades se reducían a la medida de longitud y masa. En 1937 sus actividades se extendieron a la medida de magnitudes fotométricas y radiométricas a través del Comité Consultivo de Fotometría. En 1971 el comité pasó a llamarse Comité Consultivo de Fotometría y Radiometría. Estas unidades fotométricas y radiométricas son las que más nos interesan en este texto.

En general, el valor de una magnitud se expresa como el producto de un número por una unidad. La unidad es simplemente una magnitud de referencia tomada por convención. Existen magnitudes y unidades básicas y derivadas. El SI define un conjunto de magnitudes básicas, así como las ecuaciones necesarias para obtener magnitudes derivadas. Estas ecuaciones proporcionan también las relaciones entre las unidades básicas y derivadas. Las unidades derivadas se expresan como productos de potencias de las unidades básicas.

Las magnitudes de base del SI son longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de sustancia e intensidad luminosa, y se suponen independientes. Cada magnitud de base tiene una unidad básica asociada, por ejemplo el metro en el caso de la longitud o el segundo en el caso del tiempo. Es posible obtener magnitudes derivadas adimensionales cuando se obtienen mediante divisiones de magnitudes del mismo tipo. En este caso, por convenio, se dice que la magnitud derivada es de dimensión uno y la unidad derivada es el número 1 (BIPM, 2006). Las unidades básicas, al contrario que las magnitudes básicas, pueden ser dependientes entre sí. Un ejemplo claro es la definición de metro, la cual incluye en su definición el segundo de tiempo, que a su vez es otra unidad básica.

El SI también contempla un conjunto de unidades que aunque no forman parte de él, se aceptan en ciertas situaciones donde las unidades habituales son incómodas de manejar o existe la costumbre de usar unidades antiguas. Las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 contienen los símbolos y dimensiones de las magnitudes importantes en el contexto de la Colorimetría.

La intensidad luminosa es la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente de luz por unidad de ángulo sólido en una dirección determinada. Esta cantidad se expresa mediante una ponderación de la intensidad radiante en cada longitud de onda del espectro visible. La ponderación depende de la curva de sensibilidad del ojo humano. Se define formalmente mediante la siguiente expresión (Ohta and Robertson, 2005):

$$I_v = \frac{dF}{d\Omega} = K \int_{\lambda} I(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

donde $I(\lambda)$ es la intensidad radiante espectral y $V(\lambda)$ es la función de sensibilidad introducida en el Capítulo 1.

Se observa que I_v se puede expresar en términos puramente físicos de flujo y ángulo sólido, o bien en términos fotométricos, convirtiendo una magnitud radiométrica como $I(\lambda)$ en una magnitud fotométrica I_v , que recordemos se define en función de la percepción por el ser humano (el subíndice v significa visual). En este sentido se puede decir que I_v y el resto de magnitudes fotométricas son magnitudes psicofísicas debido a que se definen en relación a nuestro mecanismo de visión (Ohta and Robertson, 2005).

Tabla 2.1: Magnitudes de base y unidades básicas en Colorimetría

Nombre	Símbolo	Unidad SI	Símbolo
Longitud	l, x	metro	m
Tiempo	t	segundo	s
Intensidad luminosa	I_v	candela	cd

Tabla 2.2: Magnitudes y unidades derivadas en Colorimetría

Magnitud	Unidad	Símbolo	Unidades básicas
Área	metro cuadrado	A	m^2
Luminancia	candela por metro cuadrado	L_v	cd/m^2

Tabla 2.3: Magnitudes y unidades auxiliares en Colorimetría

Magnitud	Símbolo	Unidad	Símbolo	Unidades básicas
Ángulo sólido	Ω	estereoradián	sr	m^2/m^2
Frecuencia	f	hertz	Hz	s^{-1}
Flujo luminoso	F	lumen	lm	cd sr
Intensidad radiante	$I(\lambda)$	vatio por estereoradián	W/sr	$m^2 \text{ kg s}^3$
Flujo radiante	$\Phi(\lambda)$	vatio	W	$m^2 \text{ kg s}^3$
Iluminancia	E_v	lux	lx	lm/m^2

Tabla 2.4: Equivalencia entre unidades SI y unidades antiguas

Magnitud	Unidad	Símbolo	Equivalencia SI
Luminancia	foot-lambert	fL	1 fL = 3.4262591 cd/m ²
Luminancia	blondel	blondel	1 blondel = $1/\pi$ cd/m ²
Luminancia	stilb	sb	1 sb = 10^4 cd/m ²
Iluminancia	phot	ph	1 ph = 10^4 lx

El flujo luminoso o potencia luminosa es una magnitud fotométrica que representa la potencia luminosa percibida. Su obtención también se lleva a cabo ponderando, en este caso el flujo radiante $\Phi(\lambda)$, con la función de sensibilidad:

$$F = 683 \int_{\lambda} \Phi(\lambda)V(\lambda)d\lambda$$

donde la integral cubre todo el espectro visible. La expresión anterior está definida para un flujo radiante de 1 W.

La intensidad radiante $I(\lambda)$ es una cantidad radiométrica definida como la medida de la intensidad de la radiación electromagnética expresada en $W \cdot sr^{-1}$. Asimismo, el flujo radiante o potencia radiante $\Phi(\lambda)$ es otra cantidad radiométrica definida como la potencia total de radiación electromagnética expresada en W. La definición estricta de flujo radiante incluye las zonas espectrales del infrarrojo y ultravioleta, aunque en el caso particular de la Colorimetría la fórmula está definida únicamente en la zona del espectro visible.

La unidad básica asociada a la intensidad luminosa es la candela (cd) que constituye una unidad de base del SI. En 1979 se estableció la definición actualmente aceptada de candela:

“La candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz y cuya intensidad de radiación emitida, en la dirección indicada, es de 1/683 vatios por estereorradián”.

La eficacia luminosa K de una radiación se obtiene como la razón entre el flujo luminoso y el flujo radiante. En el caso de la radiación con frecuencia de 540×10^{12} Hz utilizada para definir la candela se obtiene directamente una eficacia de $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$:

$$K = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} = 683 \frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{W}}$$

La radiación de frecuencia 540×10^{12} se corresponde con una longitud de onda de 555.2 nm. Esta longitud de onda se localiza en la zona del verde del espectro visible y coincide

con el máximo de la función de sensibilidad $V(\lambda)$.

La luminancia es una magnitud fotométrica que representa la intensidad luminosa por unidad de área en una dirección determinada. Esta magnitud representa la cantidad de luz emitida por una área y delimitada por un ángulo sólido determinado. La luminancia se define en términos físicos como:

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{dA d\Omega \cos\theta}$$

Probablemente la Luminancia es la magnitud que ha sido representada en un número mayor de unidades distintas en a lo largo de la historia. Como se desprende de la definición anterior, la unidad oficial es $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, pero en la bibliografía más antigua es relativamente habitual encontrar unidades como el foot-lambert, blondel o stilb. Entre todas estas unidades, el stilb está todavía aceptado en el SI, aunque no forma parte de él. La correspondencia con las unidades SI está en la Tabla 2.4.

La iluminación retinal es otra magnitud poco habitual en la colorimetría actual, pero que aparece en textos antiguos donde los experimentos se realizaban con observadores humanos y colorímetros optico-mecánicos. Se expresa en unidades de iluminancia y se suele dar en ph (phot) en los textos originales (Wright and Pitt, 1934). La iluminancia E_v es otra magnitud fotométrica que representa el flujo luminoso total incidente por unidad de superficie.

La luminancia y la iluminancia representan dos conceptos distintos. La primera se utiliza para indicar cantidad de radiación emitida por una superficie, mientras que la segunda representa la radiación recibida por una unidad de superficie.

En Colorimetría se utiliza la luminancia como indicador del total de energía luminosa procedente de las muestras observadas. Su uso es habitual para cuantificar los valores triestímulo, fundamentales en Colorimetría. La unidad de medida utilizada en las mediciones de Luminancia será la unidad de los valores triestímulo, aunque a lo largo del tiempo se han utilizado otras unidades y magnitudes para cuantificarlos (Lang, 1998).

Esta circunstancia hace que las unidades y magnitudes de los valores triestímulo no tengan una fácil interpretación. Wiszecki y Stiles (Wiszecki and Stiles, 1982) definen

los valores triestímulo como “las cantidades de tres luces de referencia (colores primarios) necesarias para conseguir una correspondencia con la luz o color considerado en el experimento mediante mezcla aditiva de luz”, donde no se incluye ninguna referencia a unidades o dimensiones.

Las cuestiones relativas a las unidades de los valores triestímulo y sus derivados se verán con detalle en la siguiente sección. Sin embargo, desde el punto de vista práctico del trabajo de laboratorio, esto no supone ningún problema. Algunas aplicaciones utilizan de hecho medidas de luminancia relativas con respecto a un estándar o blanco de referencia (Poynton, 2003), lo cual permite hacer todo el trabajo de medición y cálculo adimensionalmente, o en los términos establecidos por el BIPM con magnitudes y unidades “uno” (BIPM, 2006).

La temperatura de color correlada (CCT) o simplemente temperatura de color de una fuente de luz se define como “la temperatura a la que se debe someter un cuerpo negro ideal para producir una radiación luminosa con el mismo tono que la radiación de la fuente”. La temperatura de color es importante en fotografía digital donde se utiliza en ocasiones como sinónimo del concepto balance de blancos. La temperatura de color también se utiliza para clasificar los distintos iluminantes utilizados en experimentos de color. La recomendación de la CIE indica el uso de iluminantes D65 con temperatura de color de 6500K (CIE, 2004).

La temperatura de color de una luz con distribución espectral determinada se puede calcular a partir de sus coordenadas de cromaticidad u otras coordenadas equivalentes (ver Sección 2.2) usando diferentes métodos. Una de las ecuaciones propuestas es (Hernández-Andrés et al., 1999):

$$CCT = -949.86315 + 6253.80338 \cdot \exp\left(\frac{-n}{0.92159}\right) + 28.70599 \cdot \exp\left(\frac{-n}{0.20039}\right) + 0.00004 \cdot \exp\left(\frac{-n}{0.07125}\right)$$

donde $n = (x - x_e)/(y - y_e)$, siendo $x_e = 0.3366$ e $y_e = 0.1735$ las coordenadas de cromaticidad del epicentro. Esta ecuación es válida para temperaturas en el rango 3000-50000K,

para temperaturas mayores existe una fórmula alternativa con coeficientes distintos.

Unidades colorimétricas en el Laboratorio de Suelos

Las definiciones, unidades y magnitudes anteriores especifican formalmente los elementos de Fotometría y Colorimetría necesarios para establecer un marco de trabajo adecuado. Sin embargo, el usuario habitual del Laboratorio de Suelos interesado en el Color no necesita tener en mente todo este conjunto de conceptos y unidades.

En este sentido los conceptos absolutamente imprescindibles para llevar a cabo experimentos de medición de color se reducen a la Colorimetría básica. El usuario deberá manejar las magnitudes fotométricas fundamentales definidas anteriormente y sobre todo las unidades de los distintos espacios de color que se definen en la siguiente sección.

Una manera de facilitar la interpretación de estos nuevos espacios de color es “compararlos” con el sólido de color Munsell, bien conocido entre los edafólogos, y así buscar analogías entre las dimensiones o coordenadas que permiten definir un color de manera precisa.

Es conveniente en este punto añadir una nota sobre terminología. La evidencia experimental muestra que la descripción completa de un color requiere tres dimensiones o atributos (Capítulo 1), y por tanto en todos los espacios de color se utilizan representaciones tridimensionales, bien tomando como base el número de fotorreceptores de nuestro ojo (Aguilar y Blanca, 1995; Fairman et al., 1997; Broadbent, 2004; Schanda, 2007), bien tomando como base los correlatos psicofísicos del color que ya eran descritos por Abney, Ostwald o Munsell (Abney, 1891; Nickerson, 1976; Kuehni, 2003).

A lo largo de la Historia los nombres que se ha asignado a estos tres correlatos psicofísicos han variado, y aunque hay claras correspondencias entre todas las denominaciones también hay diferencias que es necesario conocer.

La situación actual en la que conviven varios espacios de color, todos ellos ampliamente utilizados en las aplicaciones, contribuye a la confusión al utilizar algunos términos. En ocasiones la distinta terminología es simplemente consecuencia del espacio de color utilizado en la práctica (Fairchild, 2005). La Tabla 2.5 contiene los términos

colorimétricos de los espacios más utilizados en la Ciencia del Color.

En ocasiones el idioma en el que se expresan los términos de color también puede añadir cierta indeterminación a la hora de designar el atributo exacto. En este trabajo los términos ingleses *chroma* y *lightness* se han traducido como croma y claridad. Asimismo, el término inglés *hue* se ha traducido como tono, aunque en algunos textos en castellano aparece traducido como matiz o incluso como tinte. En el caso particular de la Ciencia del Suelo, el término castellano “matiz” es ampliamente utilizado en la bibliografía. En este sentido llama la atención que la versión traducida al castellano de las *Claves para la Taxonomía de Suelos* mantiene la denominación de los atributos cromáticos en inglés, es decir, *hue*, *value* y *chroma* (Soil Survey Staff, 2010a).

En 1977, Hunt propuso cuatro niveles para la determinación sistemática de la terminología de los atributos de color (Hunt, 1977; Kuehni, 2003):

- Nivel perceptual o psicológico
- Nivel psicofísico o relacionado con los estímulos de color
- Nivel psicométrico, representado por escalas de intervalos
- Nivel psicocuantitativo, representado por escalas de relaciones o ratios

En la práctica de la Colorimetría el nivel que más nos interesa será el nivel psicofísico que está directamente relacionado con la interpretación de los estímulos de color. Una iniciativa fundamental en la sistematización de la terminología y la definición precisa de los términos es el *International Lighting Vocabulary* (ILV) (CIE, 2009).

Tabla 2.5: Atributos de color en los espacios Munsell, Yxy y CIELAB

Espacio	Tono	Saturación	Luminosidad
Munsell	Hue (Tono)	Chroma	Value (Valor)
Yxy	λ_d (λ dominante)	Purity (Pureza)	Luminance (Luminancia)
CIELAB	Hue (Tono)	Chroma	Lightness (Claridad)

2.2 Colorimetría y espacios de color CIE

La Colorimetría es la rama de la Ciencia del Color dedicada a la representación numérica de los estímulos de color (Kuehni, 2003). Esta definición no es la única existente en la bibliografía y las distintas disciplinas disponen de su propia definición del término.

Algunos autores la definen indicando que se trata una disciplina dedicada a la medida del color (Fairchild, 2005), haciendo referencia a los experimentos clásicos de igualación de color (Wyszecki and Stiles, 1982), destacando la relación con el sistema visual humano (Ohno, 2000), indicando las magnitudes que caracterizan el color (Millodot, 2009) o incluso indicando la naturaleza de las sustancias empleadas en la determinación del color (Mosby, 2012). En algunos textos se distingue entre Colorimetría básica y avanzada para acotar los problemas colorimétricos estudiados, que básicamente se pueden dividir en la medida del color y la apariencia del color (Fairchild, 2005). Aunque algunas definiciones son sin duda más detalladas, la definición reseñada en primer lugar se adapta bien al presente trabajo en el cual el tratamiento cuantitativo del color predomina sobre los aspectos teóricos.

En la actualidad la referencia fundamental de la Colorimetría básica es el informe de la *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) publicado en 2004 que contiene las recomendaciones para el uso de iluminantes, observadores, estándares de referencia para reflectancia, condiciones de visión, condiciones de iluminación, cálculo de valores triestímulo, coordenadas de cromaticidad, espacios de color, diferencias de color y fórmulas auxiliares (CIE, 2004). Este informe contempla todos los requerimientos colorimétricos de la presente tesis.

Los espacios de color utilizados en Colorimetría tienen su origen en las resoluciones de la CIE de 1931. La CIE se creó en 1913 como entidad sucesora de la *Commission Internationale de Photométrie* (CIP), fundada en 1900 en el marco de la Exposición Universal de París por un grupo de ingenieros de la industria del gas interesados en la medición de la luz producida por las lámparas de gas (CIE, 1999).

Las resoluciones tomadas por la CIE en 1931 se indican a continuación (Fairman et al., 1997; Schanda, 2007):

- Resolución 1. Se propusieron las funciones de igualación de color del observador estándar a partir de los datos recopilados por J. Guild. Estas funciones están basadas en el sistema de estímulos primarios *RGB*.
- Resolución 2. Se definieron las curvas espectrales de los iluminantes A, B y C. En 1963 la CIE recomendó sustituir el iluminante C por una serie de iluminantes D de luz diurna.
- Resolución 3. Se definieron las condiciones de iluminación para la medida de color de superficies iluminadas. La configuración se conoce actualmente como $45^\circ/0^\circ$, donde la iluminación incide sobre la muestra con una inclinación de 45° y el observador o sensor se sitúa a 0° . Ambos ángulos están referidos a la normal al plano de la muestra.
- Resolución 4. Se eligió el método tricromático para especificaciones colorimétricas. Este método está basado en el uso de los primarios *XYZ*.
- Resolución 5. Se presentaron las ecuaciones para transformar entre los espacios *RGB* y *XYZ*. Se presentó una tabla que contenía los colores espectrales en términos de coordenadas de cromaticidad *xy*.

En las resoluciones de 1931 se tomaron decisiones que redefinieron la colorimetría del momento. Estas resoluciones son vigentes hoy en día, con modificaciones mayores y menores que se han incluido a lo largo del tiempo, lo cual no afecta a los principios fundamentales de las resoluciones originales. También presentan algunas limitaciones que probablemente no se incluirían teniendo en cuenta los conocimientos actuales. Una de ellas es la importancia que se da a la definición de los colores primarios como base del sistema colorimétrico (Fairman et al., 1997). Los instrumentos modernos se basan en mayor o menor medida en el método espectrofotométrico, determinando las coordenadas colorimétricas mediante cálculos derivados de los datos espectrales. Esta aproximación se puede definir como colorimetría indirecta, en contraposición a la colorimetría visual directa basada en la definición de tres colores primarios.

Los detalles sobre el desarrollo del sistema CIE 1931 RGB no son fáciles de encontrar en la mayoría de textos existentes. La digitalización de los artículos e informes originales permite la lectura de estos documentos tan fundamentales. Algunos investigadores han

estudiado los datos, los cálculos e incluso la correspondencia entre diversos autores y han publicado artículos muy interesantes bastantes años después de la publicación de los originales (Fairman et al., 1997; Broadbent, 2004).

El sistema CIE 1931 RGB se basa en los experimentos con observadores humanos que llevaron a cabo W.D. Wright del Imperial College London y J. Guild del National Physics Laboratory (NPL). Los experimentos de ambos científicos fueron independientes, utilizando incluso colores primarios distintos. Wright utilizó primarios con longitudes de onda de 650, 530 y 460 nm, mientras que Guild utilizó los primarios recomendados por el NPL de longitudes de onda 700, 546.1 y 435.8 nm. Los datos finales se transformaron al sistema de primarios de Guild y el conjunto de datos se conoce en la comunidad científica como el conjunto de datos Wright-Guild. La experiencia previa en cuanto a teoría del color y en particular de la visión del color humana está en la base que se utilizó para diseñar el sistema y por ello en ocasiones se indica que el sistema CIE RGB es un sistema colorimétrico de base fisiológica e independiente del dispositivo.

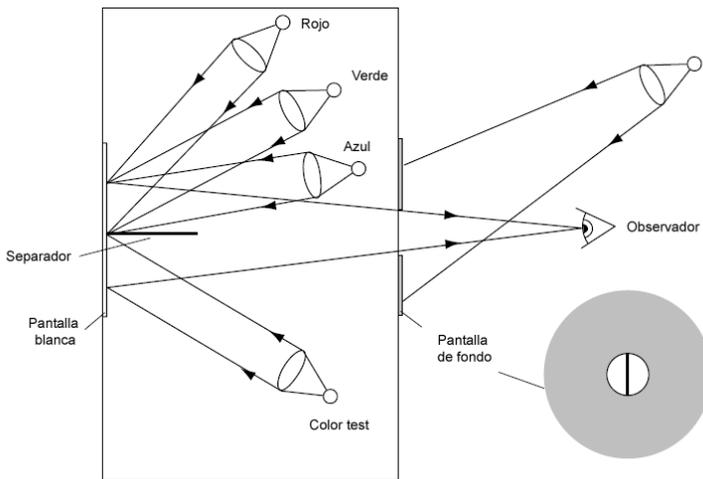


Figura 2.1: Esquema de un colorímetro con campo visual bipartito (Rigg, 1997)

Las experiencias consistían en la aplicación práctica del fenómeno de correspondencia o igualación de color tricromática, según la cual un color, sea cual sea su composición

espectral, se puede obtener mediante la mezcla aditiva o superposición de tres colores primarios arbitrarios. Esta propiedad del color se enmarca dentro de las denominadas leyes de Grassmann. Los experimentos se llevan a cabo en dispositivos denominados campos de visión bipartitos acoplados a colorímetros visuales (Figura 2.1). En estos experimentos el observador puede ajustar las cantidades de cada color primario hasta conseguir una correspondencia con el color de referencia que se desea igualar. En este contexto el término “color de referencia” se refiere a un color que presenta una longitud de onda dominante determinada el cual se desea igualar mediante la mezcla de tres colores primarios. En algunos textos el color de referencia a igualar se denomina color espectral o color test.

Los experimentos se diseñaron siguiendo una serie de requerimientos que permitan replicar las condiciones de observación en distintos laboratorios, manteniendo la premisa de visión tricromática (Broadbent, 2004):

- Los colores primarios se eligen de modo que la mezcla de dos de ellos no puede dar como resultado el tercer primario. En caso contrario no se pueden considerar colores primarios. Los colores primarios pueden ser arbitrarios, sin embargo por convenio se utilizan colores que representan los tres tipos de receptores cromáticos existentes en la retina del ojo humano. Por tanto los colores primarios se denominan R (rojo), G (verde) y B (azul).
- El nivel de iluminación debe ser alto de manera que la visión de los observadores se produce a través de los conos, es decir, en condiciones de visión fotópica
- La amplitud angular del campo de visión es de 2° para asegurar que la imagen observada se produce en la zona foveal, donde se encuentra la mayor densidad de conos.
- El observador tiene visión normal y no presenta síntomas de fatiga. Respecto a este punto parece claro que cada observador tendrá una respuesta visual única. Es necesario por tanto repetir el experimento con varios observadores con visión normal para obtener valores promedio.

Los requerimientos anteriores, basados directamente en el sistema de visión humana, permite designar el sistema colorimétrico CIE 1931 RGB como un sistema de base fisiológica.

La “cantidad” de cada color primario se puede expresar en diferentes magnitudes físicas y por tanto en diferentes unidades. Las más usuales son la potencia radiante

($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$), flujo luminoso ($\text{lumen}\cdot\text{sr}^{-1}$ o cd) o luminancia ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$). El observador puede ajustar la cantidad de cada color primario mediante mandos que modifican la anchura de las ranuras de iluminación o añadiendo filtros a las fuentes de luz.

En el caso más habitual la magnitud usada para cuantificar los colores primarios es la intensidad luminosa o luminancia. Las cantidades de colores primarios permiten establecer ecuaciones colorimétricas de manera parecida a las ecuaciones algebraicas. La nomenclatura y los símbolos utilizados al escribir ecuaciones colorimétricas difieren entre los autores y entre las épocas de edición de cada trabajo. Aquí se utiliza la nomenclatura propuesta en Fairman et al. (1997) que representa una ecuación colorimétrica con la siguiente expresión:

$$Q \equiv R \cdot \mathcal{R} + G \cdot \mathcal{G} + B \cdot \mathcal{B} \quad (2.1)$$

donde Q es el color test que será igualado por la adición de los primarios, \mathcal{R} , \mathcal{G} , \mathcal{B} representan las cantidades unitarias de los colores primarios y R , G , B son tres multiplicadores escalares denominados valores triestímulo. Al hablar de “cantidades de color” es necesario tener en cuenta que dichas cantidades se expresan por los productos $R \cdot \mathcal{R}$, $G \cdot \mathcal{G}$ y $B \cdot \mathcal{B}$ y no por los valores triestímulo. En algunos textos los valores triestímulo se representan por L_1 , L_2 , L_3 , indicando que las cantidades de cada color primario se especifica en unidades de luminancia. En el resto de este capítulo se considera que las cantidades de primarios se expresan mediante las luminancias de cada estímulo primario, aunque se mantendrá la notación de la Ecuación 2.1.

Algunos de los desarrollos incluidos en los siguientes párrafos hacen referencia a estímulos luminosos expresados indistintamente mediante valores triestímulo o mediante coordenadas de cromaticidad. Las coordenadas de cromaticidad se definen a partir de la normalización de los valores triestímulo para cualquier espacio basado en tres colores primarios. En el caso de los valores triestímulo expresados en el espacio de primarios

RGB las coordenadas de cromaticidad son:

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R+G+B} \\ g &= \frac{G}{R+G+B} \\ b &= \frac{B}{R+G+B} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Las representaciones mediante valores triestímulo o coordenadas de cromaticidad son equivalentes. El uso de coordenadas de cromaticidad tiene ventajas que se detallarán más adelante. Una característica de este espacio de cromaticidad es que un estímulo de color puede ser expresado con sólo dos coordenadas, por ejemplo rg (Figura 2.2). La Expresión 2.2 permite escribir $r + g + b = 1$ y por tanto la tercera coordenada, en este caso b , se puede obtener dadas las otras dos.

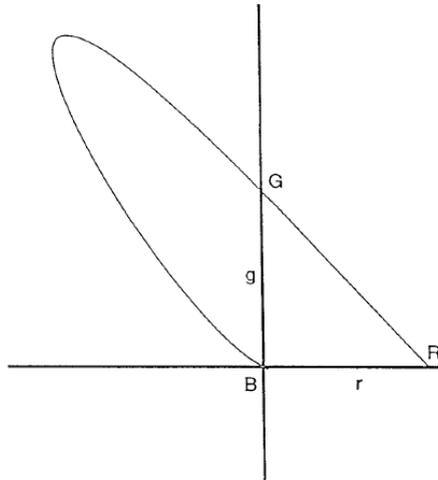


Figura 2.2: Diagrama de cromaticidad rg con la localización de los primarios \mathcal{R} \mathcal{G} \mathcal{B}

Si se produce una correspondencia entre un determinado color de referencia y una mezcla de tres primarios, se cumple la siguiente ecuación:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = R + G + B \quad (2.3)$$

Es decir, la luminancia L del color espectral de referencia se puede obtener como la suma de las luminancias de los tres primarios, o de manera equivalente como la suma de valores triestímulo siempre y cuando las cantidades de colores primarios se expresen mediante sus luminancias.

En general las relaciones entre colores formados por mezclas aditivas de un conjunto dado de colores primarios cumplen las conocidas leyes de Grassmann. Estas leyes fueron propuestas por H. Grassmann en (1853), aunque en sus documentos atribuyó parte de sus conclusiones a los trabajos de J.C. Maxwell o A. Abney, ambos más jóvenes que él. El avance de la Ciencia y de la Técnica ha comprometido la validez de estas leyes en ciertas condiciones (Brill and Robertson, 2007).

Las leyes de Grassmann son (Aguilar y Blanca, 1995; Malacara, 2002):

- La especificación de un color requiere tres elementos: tono, luminancia y saturación.
- Cada color tiene un complementario de manera que al mezclarlos se produce un color neutro o gris
- La mezcla de dos luces con colores distintos, pero con el mismo tono y saturación, produce un nuevo color con el mismo tono y saturación, independientemente de la composición espectral de los dos colores.
- La luminancia de una mezcla de luces es la suma de las luminancias de cada luz

Las leyes de Grassmann establecen un marco idóneo para el tratamiento numérico de las mezclas de color. A partir de ellas es fácil expresar en forma de ecuación algebraica las relaciones entre colores. Un color Q se expresa en términos de tres colores primarios con una ecuación aritmética:

$$Q = R \cdot \mathcal{R} + G \cdot \mathcal{G} + B \cdot \mathcal{B} \quad (2.4)$$

Si la luminancia de un color se modifica en un factor de n , los tres valores triestímulo se modifican en la misma proporción:

$$n \cdot Q = n \cdot R \cdot \mathcal{R} + n \cdot G \cdot \mathcal{G} + n \cdot B \cdot \mathcal{B}$$

Las leyes de Grassmann definen el concepto de aditividad cromática que es clave en la Colorimetría tricromática planteada en 1931. El uso de estas leyes obliga en ocasiones a utilizar valores triestímulo negativos para igualar ciertos colores, lo cual es físicamente imposible puesto que por definición la luminancia es un valor positivo. En la práctica se pueden simular valores negativos disminuyendo la saturación del color de referencia mediante la mezcla aditiva con una pequeña cantidad de uno de los primarios, de modo que el color resultante de esta mezcla se podrá igualar con una mezcla de los dos colores primarios restantes (Broadbent, 2004). La ecuación colorimétrica para este proceso de desaturación sería:

$$Q + R \cdot \mathcal{R} \equiv G \cdot \mathcal{G} + B \cdot \mathcal{B}$$

Ordenando los elementos de la ecuación obtenemos valores triestímulo negativos:

$$Q \equiv -R \cdot \mathcal{R} + G \cdot \mathcal{G} + B \cdot \mathcal{B}$$

Los experimentos de color descritos hasta el momento se basan en la intervención de observadores humanos, pero no se ha indicado como se cuantifican las respuestas de los observadores. En el Capítulo 1 se introdujo la función de sensibilidad espectral del ojo humano $V(\lambda)$. Esta función es global en el sentido que incluye la respuesta conjunta de todos los fotorreceptores presentes en la retina ante la energía luminosa recibida, sin discriminar la estructura espectral de dicha energía. Es por tanto una magnitud fotométrica. La respuesta a nivel tricromático del observador se materializó numéricamente en términos de tres funciones denominadas funciones de igualación de color, conocidas como *color matching functions* o CMF en la bibliografía en inglés. Las CMF representan la sensibilidad espectral de los tres fotorreceptores del observador estándar que dan como resultado los valores triestímulo *RGB* correspondientes a una muestra de color. El uso de las CMF fue formalizado a través de las resoluciones de 1931 y se presentaron tabuladas en intervalos de 5 nm en un rango de longitudes de onda 380-780 nm. Actualmente los datos tabulados son fácilmente accesibles en formato digital en la página web de la CIE.

Los valores triestímulo de un color se pueden obtener en términos de las CMF. Esta es una aproximación espectrofotométrica distinta a la colorimetría visual basada en la mezcla aditiva de colores primarios descrita anteriormente. Los valores triestímulo se obtienen con las siguientes expresiones (CIE, 2004):

$$\begin{aligned}
 R &= \int_{\lambda} I(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda \\
 G &= \int_{\lambda} I(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \\
 B &= \int_{\lambda} I(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

donde $I(\lambda)$ es la distribución espectral del estímulo de color y \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} son las funciones de igualación de color. Los límites de integración de estas fórmulas se extienden sobre todo el espectro visible. El estímulo de color $I(\lambda)$ puede descomponerse a su vez como el producto de dos funciones espectrales dependientes de la iluminación ambiental y de las características reflectantes del objeto observado.

La aparición de valores triestímulo negativos comentada anteriormente se observa también en el diagrama de cromaticidad y en las gráficas de las funciones de igualación de color del sistema de primarios RGB (Figuras 2.2 y 2.3). La conversión de estas representaciones en el espacio RGB a otra representación equivalente en un espacio XYZ en el cual sólo existan valores positivos fue una cuestión importante en 1931 (ver resolución 5) por la simplificación que suponía en los métodos de cálculo de la época. Esta transformación es en principio arbitraria en el sentido que los nuevos colores primarios se pueden elegir a discreción. Los criterios que se siguieron fueron la reducción del número de cálculos, aspecto ya comentado, y la obtención de un nuevo diagrama donde no se “desperdiciara espacio” (Fairman et al., 1997). Finalmente se eligieron los primarios que se observan en la Figura 2.4 y se denominaron X Y Z . Los valores numéricos de las coordenadas de cromaticidad rg de los primarios X Y Z se utilizaron para la obtención de las ecuaciones de transformación.

El espacio XYZ se diseñó con otra característica que ha resultado ser de gran utilidad en la práctica colorimétrica. La teoría permite la elección de colores primarios de manera

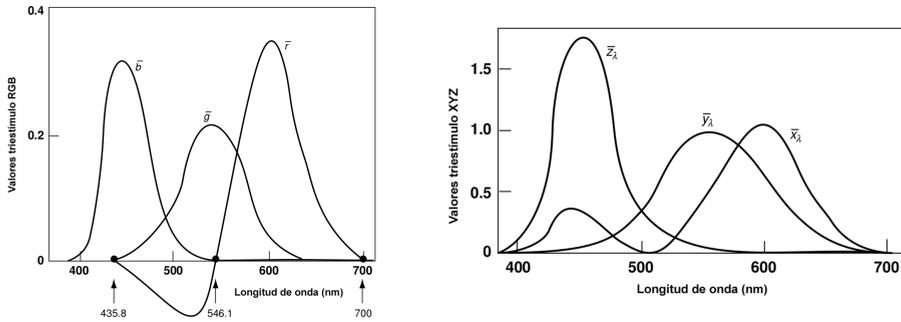


Figura 2.3: Funciones de igualación de color en los espacios RGB y XYZ

que los coeficientes de luminancia de los colores primarios tengan valores predeterminados. Esto se llevó a la práctica para que una de las funciones de igualación de color tuviera un coeficiente de luminancia unidad, mientras que las otras dos funciones de igualación tuvieran coeficientes nulos. En esta situación, la función de igualación de color elegida sería una copia de la función de sensibilidad $V(\lambda)$ de 1924 (la única disponible en aquella época) y la luminancia de un estímulo se podría representar con el valor triestímulo correspondiente (Judd, 1930; Fairman et al., 1997). El valor triestímulo elegido fue Y y la función de igualación $\bar{y}(\lambda)$. Estos condicionantes se pueden desarrollar formalmente tal y como se muestra a continuación (Fairman et al., 1997).

Los nuevos colores primarios $\mathcal{X}\mathcal{Y}\mathcal{Z}$, que pueden ser reales o no, se pueden obtener mediante la mezcla de los primarios originales $\mathcal{R}\mathcal{G}\mathcal{B}$, lo cual se puede escribir en forma de ecuaciones colorimétricas:

$$\begin{aligned}\mathcal{X} &\equiv a_{11} \mathcal{R} + a_{12} \mathcal{G} + a_{13} \mathcal{B} \\ \mathcal{Y} &\equiv a_{21} \mathcal{R} + a_{22} \mathcal{G} + a_{23} \mathcal{B} \\ \mathcal{Z} &\equiv a_{31} \mathcal{R} + a_{32} \mathcal{G} + a_{33} \mathcal{B}\end{aligned}\tag{2.6}$$

donde los coeficientes a_{ij} son en realidad los valores triestímulo de cada color primario \mathcal{X} , \mathcal{Y} , \mathcal{Z} en el espacio RGB . El símbolo \equiv indica la equivalencia o igualación colorimétrica, mientras que el símbolo $+$ indica la adición o mezcla de ciertas cantidades de colores

primarios. En las ecuaciones algebraicas que siguen el operador de igualdad cromática (\equiv) se sustituye por el operador de igualdad algebraica ($=$) en virtud de las propiedades descritas por las leyes de Grassmann.

Por otra parte un color Q tendrá su correspondiente ecuación colorimétrica en el espacio XYZ :

$$Q = X \mathcal{X} + Y \mathcal{Y} + Z \mathcal{Z} \tag{2.7}$$

Sustituyendo las Ecuaciones 2.6 en la Ecuación 2.7 y agrupando términos podemos expresar Q en función de los primarios iniciales $\mathcal{R}\mathcal{G}\mathcal{B}$:

$$Q = (a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}Z) \mathcal{R} + (a_{12}X + a_{22}Y + a_{32}Z) \mathcal{G} + (a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}Z) \mathcal{B} \tag{2.8}$$

Igualando coeficientes entre las Ecuaciones 2.4 y 2.8 podemos establecer una transformación entre los espacios RGB y XYZ :

$$\begin{aligned} R &= a_{11} X + a_{21} Y + a_{31} Z \\ G &= a_{12} X + a_{22} Y + a_{32} Z \\ B &= a_{13} X + a_{23} Y + a_{33} Z \end{aligned} \tag{2.9}$$

La Ecuación 2.9 permite transformar colores RGB a partir de colores XYZ . La notación matricial de dicha transformación es:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \tag{2.10}$$

donde la matriz A es la matriz de coeficientes a_{ij} .

La transformación inversa de estímulos de color desde el espacio RGB al espacio XYZ se puede llevar a cabo mediante cálculo matricial elemental, invirtiendo la matriz de

transformación de la Ecuación 2.10. Esta transformación es la que realmente interesa a efectos prácticos y se obtiene por tanto con la expresión:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Esta transformación requiere conocer al menos tres colores en los dos espacios RGB y XYZ , por ejemplo los colores primarios. Inicialmente sólo se conocen las coordenadas RGB de dichos colores primarios por lo cual es necesario obtener sus imágenes en el espacio XYZ mediante alguna aproximación matemática y geométrica. Aquí es donde se aplican los condicionantes mencionados anteriormente referentes a ajustar el nuevo espacio al lugar espectral existente en el espacio RGB y a asimilar una de las funciones de igualación de color con la función de sensibilidad espectral $V(\lambda)$, o equivalentemente igualar uno de los valores triestímulo con la luminancia.

Se eligieron los primarios de la Figura 2.4, donde se observa un triángulo que se adapta a la forma del locus espectral del diagrama de cromaticidad rg . Una vez determinado gráficamente y analíticamente el triángulo formado por los nuevos primarios $X'Y'Z'$ se podrán calcular sus valores triestímulo en el espacio RGB .

El ajuste a la función de sensibilidad se hizo a partir de una combinación lineal de las funciones de igualación de color $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$ a la función de sensibilidad $V(\lambda)$. Los coeficientes de luminancia asignados en 1931 a cada función de igualación fueron 1:4.5907:0.0601. Se denominan coeficientes de luminancia puesto que la magnitud usada para expresar las cantidades de colores primarios en los experimentos de igualación fue la luminancia de cada estímulo primario. La normalización de estos coeficientes da unos valores de 0.17697:0.81240:0.01063 de manera que un color con coordenadas de cromaticidad r, g, b tendrá una luminancia proporcional a:

$$0.17697r + 0.81240g + 0.01063b \quad (2.11)$$

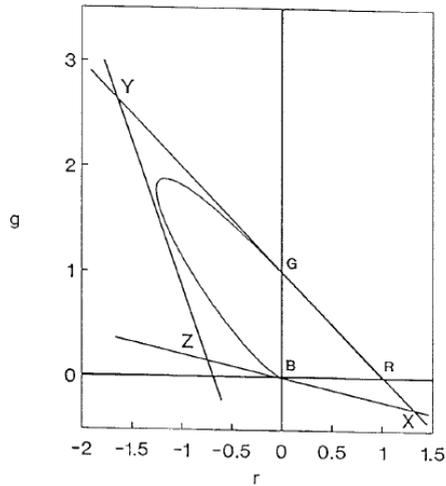


Figura 2.4: Primarios X Y Z sobre el diagrama de cromaticidad rg

La propia definición de coordenadas de cromaticidad (Ecuación 2.2) establece la relación $b = 1 - r - g$. Sustituyendo esta expresión en 2.11 e igualando a cero se obtiene una recta de estímulos de luminancia nula:

$$0.16634r + 0.80177g + 0.01063 = 0 \tag{2.12}$$

La elección de un conjunto de primarios en el cual la luminancia esté representada por uno de ellos, por ejemplo Y , requiere que los otros dos primarios X y Z tengan coordenadas de cromaticidad que estén sobre la línea anterior.

La condición anterior (representación de la luminancia en uno de los primarios) se debe complementar con la condición planteada anteriormente para que todos los nuevos valores triestímulo sean positivos. Geométricamente esto equivale a transformar el triángulo de la Figura 2.4 a un nuevo espacio de cromaticidad en el cual dicho triángulo esté contenido íntegramente en el primer cuadrante.

La recta que contiene a los primarios X e Y se formuló teniendo en cuenta que la magnitud de la coordenada de cromaticidad b siempre es menor de 0.01 veces la magnitud

Tabla 2.6: Coordenadas *rgb* de los primarios \mathcal{X} \mathcal{Y} \mathcal{Z}

Primario	r	g	b
\mathcal{X}	1.2749	-0.2777	0.0028
\mathcal{Y}	-1.7400	2.7677	-0.0277
\mathcal{Z}	-0.7430	0.1408	1.6022

de la coordenada *g*. La recta elegida fue:

$$99 \cdot g = -100 \cdot (1 - r) \quad (2.13)$$

La intersección de las rectas 2.12 y 2.13 da como resultado las coordenadas de cromaticidad r_X y g_X del primario \mathcal{X} . La tercera coordenada se puede calcular de manera inmediata. El tercer lado del triángulo se eligió de modo que intersectaba en $r = -0.743$ con la recta de luminancia nula y en $r = -1.74$ con la línea que une los primarios \mathcal{X} e \mathcal{Y} . Los valores *rgb* de los tres primarios están en la Tabla 2.6.

La transformación geométrica se puede plantear con las coordenadas de cromaticidad de la Tabla 2.6:

$$\alpha \mathcal{X} = 1.2749 \cdot \mathcal{R} - 0.2777 \cdot \mathcal{G} + 0.0028 \cdot \mathcal{B}$$

$$\beta \mathcal{Y} = -1.7400 \cdot \mathcal{R} + 2.7677 \cdot \mathcal{G} - 0.0277 \cdot \mathcal{B}$$

$$\gamma \mathcal{Z} = -0.7430 \cdot \mathcal{R} + 0.1408 \cdot \mathcal{G} + 1.6022 \cdot \mathcal{B}$$

Operando sobre la transformación anterior se llega a la expresión que permite obtener valores triestímulo *XYZ* a partir de valores triestímulo *RGB* (Fairman et al., 1997):

$$X = 0.9088 \alpha R + 0.5751 \alpha G + 0.3709 \alpha B$$

$$Y = 0.09110 \beta R + 0.4187 \beta G + 0.0055 \beta B$$

$$Z = 0.0000 \gamma R + 0.0062 \gamma G + 0.6235 \gamma B$$

donde α , β , γ son factores de escala que se eligieron para que el punto $(R, G, B) = (1, 1, 1)$

se transformara en $(X, Y, Z) = (1, 1, 1)$. La matriz de transformación que se adoptó finalmente fue:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4900 & 0.3100 & 0.2000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.0000 & 0.0099 & 0.9901 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

El resultado del desarrollo anterior tiene como consecuencia que en las aplicaciones prácticas se utiliza rutinariamente el espacio de valores triestímulo XYZ y su espacio deromaticidad asociado Yxy en lugar del sistema de primarios reales RGB. Los principios de diseño del sistema probablemente no se plantearían en estos términos con el nivel de conocimiento actual (Fairman et al., 1997). Sin embargo, las ventajas del sistema CIE XYZ 1931 han hecho que hoy en día todavía se utilice de manera generalizada.

Los experimentos de color de 1931, en particular la definición de las funciones de igualación de color, se llevaron a cabo sobre campos bipartitos de 2° de amplitud. Estas funciones constituyen lo que se conoce como observador estándar de 1931. Existe otro observador estándar que fue introducido en 1964 para el cual se utilizaron campos de visión de 10° de amplitud. En este caso las funciones de igualación de color tienen la notación $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ para distinguirlas de sus equivalentes de 1931.

Este observador de 1964 no cumple evidentemente las condiciones del observador de 1931. Un aspecto fundamental que los diferencia es que el ángulo de 10° estimula los fotorreceptores externos a la zona foveal donde la densidad de bastones es mayor, y por tanto se puede dar un sistema de visión no estrictamente tricromático, en contraposición a la teoría tricromática que está en la base de la Colorimetría. En esta situación la función de igualación $\bar{y}_{10}(\lambda)$ no se puede ajustar a la función de sensibilidad $V(\lambda)$ con la misma exactitud que en el caso de la función $\bar{y}(\lambda)$ y de hecho la CIE no ha aprobado todavía la equivalencia entre estas dos funciones, al contrario de lo que sucede en el observador de 1931, donde ambas funciones son idénticas (Ohta and Robertson, 2005). El campo de visión de 10° también tiene como consecuencia que no se cumplan algunas de las leyes de Grassmann, lo cual es otro inconveniente adicional.

Anteriormente se indicó que los valores triestímulo en un sistema de colores primarios

determinado se pueden obtener con una aproximación distinta al principio de aditividad cromática propuesto en 1931. Se trata del método espectrofotométrico, utilizado en la instrumentación actual. En este contexto, los valores triestímulo se obtienen mediante las siguientes expresiones (CIE, 2004):

$$\begin{aligned} X &= k \cdot \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= k \cdot \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= k \cdot \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (2.14)$$

donde X Y Z son los valores triestímulo, k es una constante de normalización, $\phi(\lambda)$ es la función que caracteriza la reflectancia o transmitancia que interviene en la formación del estímulo de color y $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ son las funciones de igualación de color. Estas expresiones recuerdan a las Ecuaciones 2.5.

Las Ecuaciones 2.14 muestran que el procedimiento para obtener los valores triestímulo consiste en multiplicar la función de reflectancia $\phi(\lambda)$ por la función de igualación de color correspondiente en cada valor de la longitud de onda λ , integrando el conjunto de productos sobre el rango completo del espectro visible desde 360 nm hasta 830 nm. El término $\Delta\lambda$ indica que los productos se realizan sobre un conjunto discreto de intervalos, siendo el intervalo recomendado de 1 nm.

Las fórmulas anteriores son válidas para objetos emisores de luz. En el caso de muestras que reflejan luz, la función $\phi(\lambda)$ se forma a partir de la interacción de la iluminación ambiente y las características reflectantes del objeto. En esta situación la función $\phi(\lambda)$ se obtiene con la siguiente expresión:

$$\phi(\lambda) = R(\lambda) \cdot S(\lambda)$$

donde $R(\lambda)$ es la reflectancia espectral del objeto y $S(\lambda)$ es la distribución espectral relativa del iluminante. En el caso de objetos transparentes se utiliza la transmitancia espectral $\tau(\lambda)$ en lugar de la reflectancia espectral.

La constante de normalización k se obtiene con la expresión:

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)}$$

El espacio CIE 1931 XYZ constituye el espacio de color fundamental de la Colorimetría básica. Asimismo, los valores triestímulo de las muestras se pueden utilizar como los datos básicos y suficientes para la Colorimetría que se lleva a cabo en el Laboratorio de Suelos (Torrent and Barrón, 1993). Sin embargo, debido a limitaciones en la interpretación de los valores triestímulo, se suelen utilizar otros espacios de color entre los que destaca el espacio Yxy y el espacio CIELAB. Las coordenadas xy se denominan coordenadas de cromaticidad y se representan habitualmente sobre el diagrama de cromaticidad (Figura 2.5). Las fórmulas para transformar valores triestímulo en coordenadas de cromaticidad ya han sido introducidas previamente en el espacio RGB (Ecuaciones 2.2). Las coordenadas de cromaticidad se representan en minúsculas por convenio. Las expresiones para obtener coordenadas de cromaticidad xyz en el espacio XYZ son análogas:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (2.15)$$

A partir de las expresiones anteriores se observa que $x + y + z = 1$ de modo que conociendo dos coordenadas de cromaticidad es posible obtener la tercera coordenada. El procedimiento usado en las aplicaciones prácticas es utilizar las coordenadas xy para representar la cromaticidad. Estas dos coordenadas, junto con el valor triestímulo Y , forman el espacio Yxy, el cual permite dividir un estímulo de color en sus componentes cromática xy y acromática Y . Esta división facilita el tratamiento numérico y la representación gráfica del color al reducir la dimensionalidad cromática a dos. Además, el valor triestímulo Y representa la luminancia L gracias a los mecanismos de diseño del espacio XYZ que se han reseñado anteriormente.

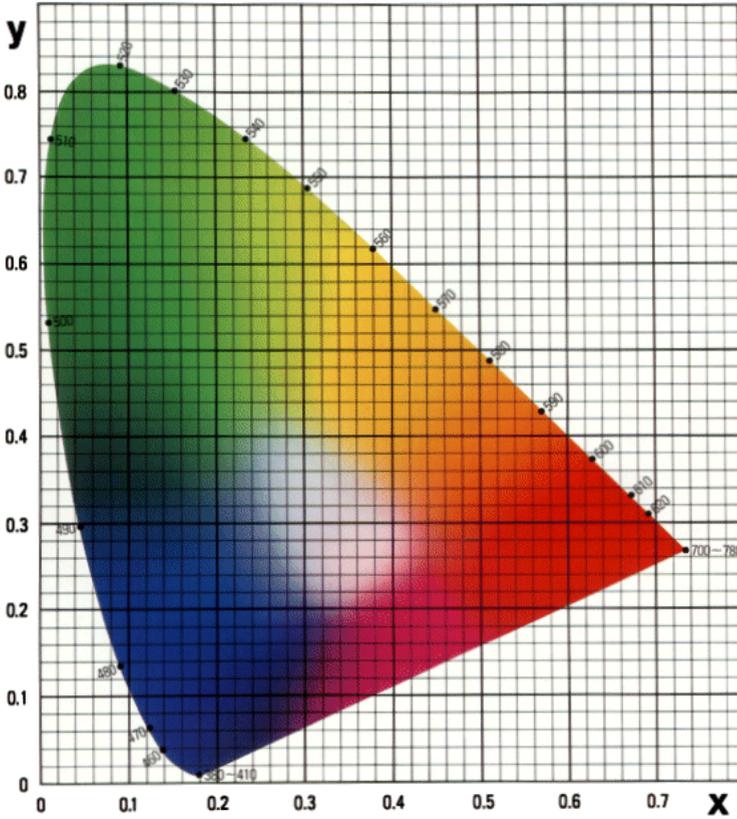


Figura 2.5: Diagrama de cromaticidad xy

Las expresiones inversas para transformar entre los espacios Yxy y XYZ se pueden obtener fácilmente:

$$\begin{aligned} X &= Y \cdot (x/y) \\ Y &= Y \\ Z &= Y \cdot (1 - x - y)/y \end{aligned} \tag{2.16}$$

El diagrama de cromaticidad xy permite calcular gráficamente o analíticamente dos parámetros de color denominados longitud de onda dominante (λ_d) y pureza de excitación o simplemente pureza (p_e). Estos dos parámetros son análogos al tono y la saturación en otros espacios de color tal y como se comentó anteriormente (Tabla 2.5). El proceso se basa en realizar mediciones sobre la recta que une un estímulo de color A y el punto neutro w (Figura 2.6). La semirrecta con origen en el punto neutro w que contiene el punto A intersecta al contorno del diagrama de cromaticidad o *locus* espectral en el punto B . El punto B indica directamente la longitud de onda dominante ya que dicho punto está situado sobre el *locus* espectral. El valor numérico de λ_d se obtendrá mediante interpolación entre los dos valores de λ más cercanos en el locus espectral (600 y 610 nm en este caso). La prolongación de la semirrecta \overline{wA} por el extremo opuesto intersecta con el *locus* espectral en el punto C que representa la longitud de onda del color complementario de A .

La pureza de excitación se obtiene con el siguiente procedimiento. Sobre la semirrecta \overline{wB} se obtienen las longitudes de los segmentos \overline{wB} y \overline{wA} . El valor de la pureza se obtiene con la expresión $p_e = \overline{wA}/\overline{wB}$. El cálculo analítico requiere conocer las coordenadas de cromaticidad de los tres estímulos W , B y C y se obtiene con la siguiente expresión:

$$p_e = \sqrt{\frac{(x_A - x_w)^2 + (y_A - y_w)^2}{(x_B - x_w)^2 + (y_B - y_w)^2}} \tag{2.17}$$

En el primer apartado de este capítulo se introdujeron unidades y magnitudes físicas relacionadas con la práctica de la Fotometría y la Colorimetría. En este sentido hay

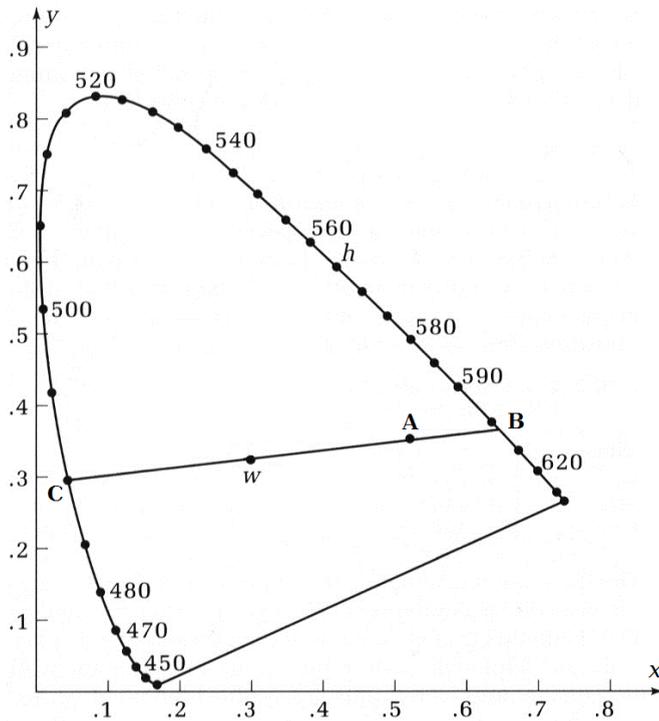


Figura 2.6: Longitud de onda dominante y pureza p_e

que destacar la ambigüedad en las unidades utilizadas para la determinación de los valores triestímulo y de todos los sistemas de coordenadas derivados a partir de él. Las unidades utilizadas en la determinación de la cromaticidad de un color no tienen una interpretación clara. Esto se demuestra a la vista de los debates llevados a cabo por algunos autores (Brill, 1996; Lang, 1998). La propia definición del sistema de colores primarios permite especificar las cantidades de los mismos en distintas unidades. Anteriormente también se indicó que los propios valores triestímulo, expresados en cualquier espacio, *RGB* o *XYZ*, son simplemente escalares que multiplican a los primarios en ecuaciones de igualación de color, mientras que las dimensiones están implícitas en las cantidades de los propios primarios (Brill, 1996; Fairman et al., 1997). Esta aparente ambigüedad es una cuestión en cierta manera secundaria, quizá más relacionada con aspectos filosóficos. Una metodología de laboratorio clara, sencilla y consistente, evitará cualquier problema

relacionado con el uso de distintas unidades y espacios de color en el Laboratorio de Suelos.

Espacios de color uniformes

Una última, pero no menos importante, cuestión con respecto a los espacios de color CIE es su interpretación matemática y sobre todo geométrica. Esta interpretación es fundamental para la propia práctica de la colorimetría, como indica la introducción de espacios de color uniformes con posterioridad a los espacios de color originales de 1931. Las propiedades métricas y geométricas son también importantes para el tratamiento de datos con técnicas más modernas, tal y como se desarrolla en el Capítulo 4 de este trabajo. En particular, la técnica de aprendizaje automático de los k vecinos más próximos, utilizada para la conversión entre espacios de color se basa en el propio concepto de distancia, en el sentido en que se define en un espacio métrico.

Las propiedades métricas del espacio de color se estudiaron de manera más o menos rigurosa tras las resoluciones de 1931 (Moon and Spencer, 1943; Wundheiler, 1946), aunque anteriormente von Helmholtz trabajó sobre la idea de la métrica del color en el contexto del cálculo de diferencias mínimas perceptibles entre colores. MacAdam (1937) también estudió las propiedades métricas de los espacios de color mediante transformaciones proyectivas del espacio de coordenadas de cromaticidad.

El espacio de cromaticidad xy es un espacio afín. La introducción de una métrica en dicho espacio afín permite tratar los problemas de discriminación del color como un problema geométrico basado en el concepto de distancia. El objetivo final es establecer la distancia euclídea como métrica del espacio de color para convertirlo en el espacio euclídeo habitual en geometría (Moon and Spencer, 1943).

Sin embargo esto no es posible directamente tal y demuestra la evidencia experimental. El trabajo más conocido en este sentido es el que realizó MacAdam en el cual presentó sus elipses de diferencia de color (MacAdam, 1942). En este trabajo seleccionó 25 puntos repartidos sobre el diagrama de cromaticidad CIE y efectuó experimentos de igualación de color para determinar diferencias de color perceptibles. La luminancia de las muestras de

color se fijó en un valor de 150 blondels sobre un fondo neutro con la mitad de luminancia.

La igualación de color en cada punto se realizó a lo largo de varias líneas de igual cromaticidad, calculando a continuación la desviación típica a lo largo de cada línea. Estas desviaciones típicas se dibujaron a continuación sobre el diagrama de cromaticidad y se observó que las figuras obtenidas eran elipses con distintos tamaños y orientaciones (Figura 2.7).

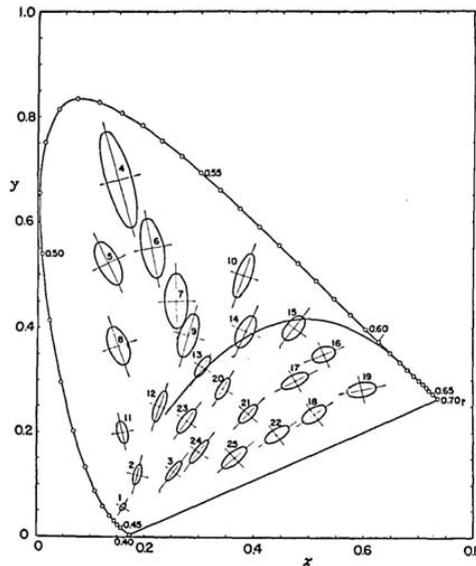


Figura 2.7: Elipses de MacAdam

Las experiencias de MacAdam muestran que aunque el espacio de color pueda ser considerado localmente euclídeo (Moon and Spencer, 1943), el conjunto total de dicho espacio no lo es y por tanto es necesario transformar el espacio de cromaticidad en otros espacios que conserven en mayor grado la métrica euclídea.

Una interesante aproximación consiste en transformar la geometría de las elipses al espacio CIE XYZ con las ecuaciones inversas correspondientes (Ecuaciones 2.16). El trazado de estas nuevas elipses sobre el plano XZ proporciona un resultado sorprendente donde se observa que los ejes mayores de las elipses son todos ellos paralelos, sucediendo lo mismo con los ejes menores (Figura 2.8).

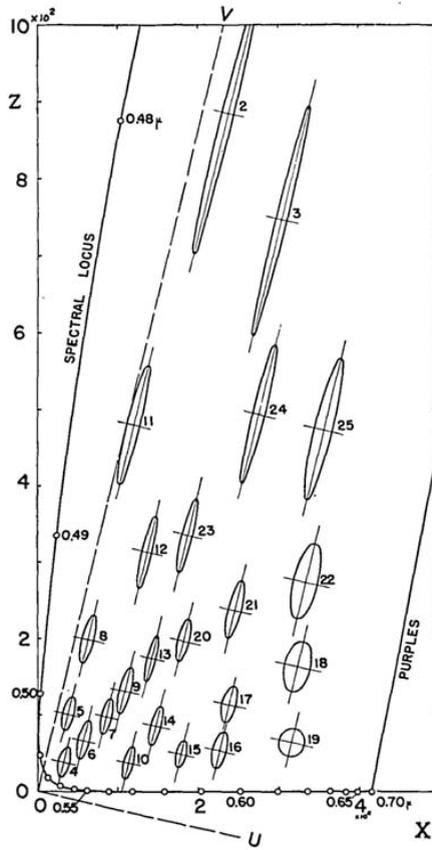


Figura 2.8: Elipses de MacAdam proyectadas sobre el plano XZ

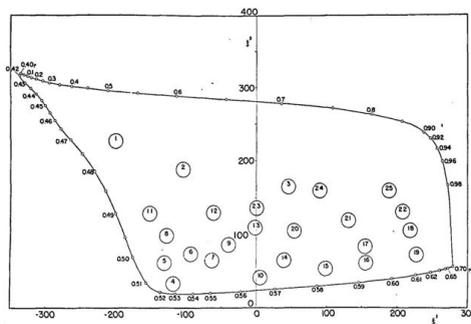


Figura 2.9: Diagrama $\xi_1 \xi_2$

El establecimiento de la métrica euclídea se puede llevar a cabo en esta nueva representación aplicando una transformación que convierta las elipses en círculos. Para llevar a cabo esta transformación se introdujeron otros dos condicionantes (Moon and Spencer, 1943). En primer lugar se aplicó una rotación sobre el eje Y para obtener unos nuevos ejes de coordenadas UV paralelos a los ejes de las elipses (Figura 2.8). En segundo lugar se aplicó otra transformación de modo que los radios de los nuevos círculos tuvieran un valor unitario con lo cual es posible introducir una escala (o unidad de medida) en los experimentos de discriminación de color.

El resultado es un nuevo diagrama de cromaticidad que presenta claras deformaciones con respecto al diagrama de cromaticidad CIE (Figura 2.9). Las transformaciones se basan en funciones no lineales adaptadas a los datos de la época (Moon and Spencer, 1943). Los propios autores sugieren que para estandarizar el uso de espacios uniformes serían necesarios más datos y evidencias experimentales. Sin embargo, los espacios uniformes introducidos con posterioridad se han basado en transformaciones no lineales como se propuso en estos trabajos iniciales.

Los espacios de color uniformes recomendados por la CIE son el CIELUV y el CIELAB (CIE, 2004). Existe un documento específico sobre el espacio CIELAB donde se establece de manera precisa la terminología, símbolos y definición del sistema (CIE, 2007). La aplicación fundamental de los espacios de color uniformes es el cálculo de diferencias de color. En estos espacios no se cumplen de manera estricta las propiedades de los espacios CIE XYZ o CIE Yxy, como por ejemplo la aditividad de colores o las leyes de Grassmann. En particular el cambio de la luminancia puede producir cambios significativos en las coordenadas cromáticas, al contrario que en el espacio CIE Yxy donde las coordenadas xy son, al menos en teoría, invariantes a los cambios de luminancia (Artigas and Felipe, 1987).

El cálculo de las coordenadas CIELAB se lleva a cabo con las siguientes expresiones (CIE, 2004; CIE, 2007):

$$L^* = 116 \cdot f(Y/Y_n) - 16 \tag{2.18}$$

$$a^* = 500 \cdot [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \tag{2.19}$$

$$b^* = 200 \cdot [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \tag{2.20}$$

donde

$$f(X/X_n) = \begin{cases} (X/X_n)^{1/3} & \text{si } (X/X_n) > (6/29)^3 \\ (841/108) \cdot (X/X_n) + (4/29) & \text{si } (X/X_n) \leq (6/29)^3 \end{cases}$$

$$f(Y/Y_n) = \begin{cases} (Y/Y_n)^{1/3} & \text{si } (Y/Y_n) > (6/29)^3 \\ (841/108) \cdot (Y/Y_n) + (4/29) & \text{si } (Y/Y_n) \leq (6/29)^3 \end{cases}$$

$$f(Z/Z_n) = \begin{cases} (Z/Z_n)^{1/3} & \text{si } (Z/Z_n) > (6/29)^3 \\ (841/108) \cdot (Z/Z_n) + (4/29) & \text{si } (Z/Z_n) \leq (6/29)^3 \end{cases}$$

Las coordenadas X, Y, Z son los valores triestímulo de la muestra observada y X_n, Y_n, Z_n los valores triestímulo de un estándar o blanco de referencia cuya reflectancia es próxima al 100%.

Las coordenadas CIELAB se representan sobre un sólido de color tridimensional en forma de esfera (Figura 2.10). Los tres ejes de coordenadas se denominan a^*, b^*, L^* de modo que la información cromática está contenida en el plano a^*b^* y la claridad en el eje L^* . El sistema CIELAB está basado en la teoría de colores oponentes (Capítulo 1) de manera que el eje a^* representa los oponentes rojo-verde y el eje b^* los colores oponentes amarillo-azul. Obsérvese que la ordenación de colores sobre el plano a^*b^* está invertida con respecto a la ordenación de colores del círculo de Munsell (Sección 1.4).

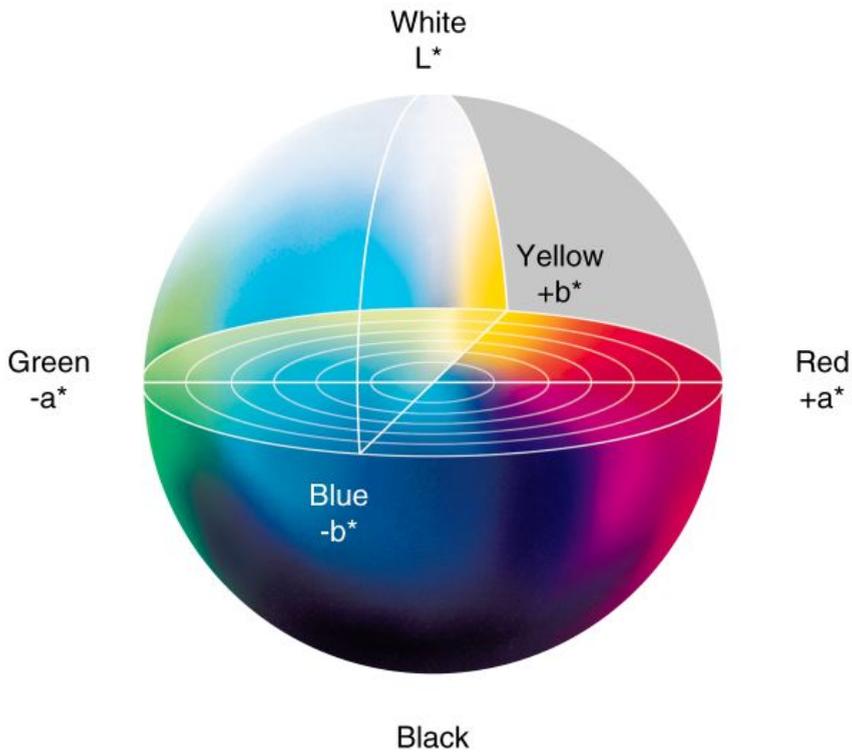


Figura 2.10: Espacio CIELAB

El espacio CIELAB ofrece la posibilidad de calcular correlatos psicofísicos del color. Estos correlatos se denominan tono, croma y claridad. La claridad L^* ha sido calculada en la Fórmula 2.18, mientras que los correlatos para el croma y el tono se pueden calcular con las expresiones siguientes:

$$C_{ab}^* = [(a^*)^2 - (b^*)^2]^{1/2} \quad (2.21)$$

$$h_{ab}^* = \arctan(b^*/a^*) \quad (2.22)$$

El espacio CIELAB permite calcular diferencias de color mediante distancias euclídeas entre dos estímulos de color representados por puntos en dicho espacio. La diferencia de

color entre dos estímulos C_1 y C_2 es:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L_{ab}^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.23)$$

donde $\Delta L_{ab} = L_2^* - L_1^*$ es la diferencia de claridad, $\Delta a^* = a_2^* - a_1^*$ la diferencia en a^* y $\Delta b^* = b_2^* - b_1^*$ la diferencia en b^* .

También es posible calcular diferencias en términos de correlatos perceptuales croma y ángulo de tono:

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab,2}^* - C_{ab,1}^* \quad (2.24)$$

$$\Delta h_{ab} = h_{ab,2} - h_{ab,1} \quad (2.25)$$

En el caso particular de la diferencia de ángulo de tono Δh_{ab} los valores fuera del rango $\pm 180^\circ$ se corregirán sumando o restando 360° para mantener las diferencias en ese rango.

La CIE también proporciona fórmulas para calcular diferencias de tono que no se deben confundir con las diferencias de ángulo de tono de la Ecuación 2.25. La diferencia de tono es:

$$\Delta H_{ab}^* = 2 \cdot \sqrt{C_{ab,1}^* \cdot C_{ab,2}^*} \cdot \sin\left(\frac{\Delta h_{ab}}{2}\right) \quad (2.26)$$

Las diferencias de correlatos perceptuales permiten plantear una expresión equivalente para la diferencia de color CIELAB:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L_{ab}^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2} \quad (2.27)$$

Existen otras fórmulas de cálculo de diferencia de color entre las cuales están las fórmulas CIE94, CIEDE2000, CMC(1:c) y DIN 99 (CIE, 2004). Las dos primeras han sido propuestas por la CIE, mientras que las dos últimas han sido desarrolladas por otras instituciones. Todas ellas son modificaciones de la fórmula de diferencia de color CIELAB ΔE_{ab}^* en la forma expresada en la Ecuación 2.27.

La fórmula CIE94 modifica los valores de ΔL_{ab}^* , ΔC_{ab}^* , ΔH_{ab}^* mediante unos factores de ponderación. La fórmula CIE94 ha sido sustituida por la fórmula CIEDE2000 que sigue el mismo procedimiento de modificar los correlatos CIELAB con fórmulas más complejas. Las correcciones de la fórmula CIEDE2000 son debidas a efectos conocidos por la evidencia experimental e incluyen los efectos de la dependencia de la claridad, croma y tono, así como la interacción entre croma y tono sobre la diferencia de color percibida.

La fórmula CMC(l:c) está basada en la CIE94, pero con diferencias a la hora de calcular los factores de ponderación. En los cálculos intervienen dos parámetros l y c que tendrán valores distintos según la naturaleza de las muestras observadas. En el análisis de muestras textiles suelen ser $l = 2$ y $c = 1$, en cuyo caso se indicará que la fórmula usada es la CMC(2:1). La fórmula DIN 99 permite crear un nuevo espacio de diferencias de color, lo cual la diferencia de las anteriores.

Todas estas fórmulas de diferencia de color mejoradas necesitan ser evaluadas en condiciones de laboratorio muy estrictas. Algunas de estas condiciones hacen que su aplicación en el Laboratorio de Suelos sea poco viable. Las dos limitaciones más importantes son el tamaño de la muestra, que debe producir campos de visión mayores de 4° y la preparación de muestras completamente homogéneas. El ángulo de 4° obligaría a preparar muestras con mayor cantidad de material, lo cual no siempre es posible porque en ocasiones la cantidad de muestra extraída es muy pequeña. La homogeneidad de las muestras es un inconveniente todavía mayor puesto que el propio material que compone las muestras es heterogéneo al ser una mezcla de los componentes del suelo. Como consecuencia no parece adecuado el uso de fórmulas mejoradas para las tareas de medición del color de muestras de suelo como es el caso del presente trabajo.

Experimentos de Color

La documentación de los experimentos de color debe incluir las condiciones de observación, siendo especialmente importante especificar el iluminante y la geometría de iluminación. Existen recomendaciones CIE para establecer estos dos aspectos de la experi-

mentación (CIE, 2004).

En cuanto al iluminante, la CIE recomienda el uso del D65, definido como el iluminante representado con una distribución espectral relativa que representa la fase de luz diurna con una temperatura de color correlada de 6500 K.

Si no es posible usar el iluminante D65, se utilizarán por orden preferente los iluminantes D50, D55 o D75. Si tampoco es posible usar estos iluminantes será necesario obtener la temperatura de color nominal del iluminante D en cuestión y en caso necesario su distribución espectral podrá ser aproximada mediante un procedimiento estándar.

En primer lugar se calcularán las coordenadas de cromaticidad del iluminante mediante las fórmulas:

$$x_D = \frac{-4.6070 \times 10^9}{T_{cp}^3} + \frac{2.9678 \times 10^6}{T_{cp}^2} + \frac{0.09911 \times 10^3}{T_{cp}} + 0.244063$$

$$y_D = -3.000 \cdot x_D^2 + 2.870 \cdot x_D - 0.275$$

Las formulas anteriores son válidas para temperaturas desde 4000 K hasta 7000 K aproximadamente. En temperaturas superiores se utilizarán fórmulas alternativas (CIE, 2004).

A partir de las coordenadas de cromaticidad x_D , y_D se podrá estimar la distribución espectral del iluminante mediante la expresión:

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 \cdot S_1(\lambda) + M_2 \cdot S_2(\lambda) \tag{2.28}$$

donde $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ son los componentes CIE de luz diurna disponibles en forma de tabla con una resolución de 5 nm (CIE, 2004).

Los factores M_1 y M_2 se obtienen a partir de las coordenadas de cromaticidad calculadas en el paso anterior mediante las fórmulas siguientes:

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703 x_D + 5.9114 y_D}{0.0241 + 0.2562 x_D - 0.7341 y_D}$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 3144243 x_D + 30.0717 y_D}{0.0241 + 0.2562 x_D - 0.7341 y_D}$$

Es importante destacar que un iluminante es la descripción teórica de un elemento que proporciona iluminación estable para llevar a cabo experimentos de color. Esta descripción está especificada por la distribución espectral relativa del iluminante. La realización práctica o implementación de un iluminante se denomina fuente de iluminación y constituye el elemento que se utiliza realmente en la experimentación. En este sentido es necesario asegurar que la fuente de iluminación sigue fielmente la especificación teórica. La CIE ha publicado especificaciones prácticas para la fabricación de iluminantes A, B y C. Por ejemplo el iluminante A se fabrica en forma de lámpara rellena de gas y con un filamento de tungsteno que opera a una temperatura de color de 2856 K. En el caso del iluminante D65 esta especificación no está disponible, aunque es el recomendado por la CIE, de modo que los distintos fabricantes pueden implementarlo de diferentes maneras. Hasta que llegue el momento de la especificación del iluminante D65, los usuarios pueden comprobar en caso necesario la calidad de las fuentes de luz o simuladores D65 mediante un procedimiento estándar.

La calidad del simulador de luz diurna D65 y de otros tipos de luz diurna se basa en el índice de metamerismo especial con cambio de iluminante M_{ilm} . El procedimiento se realiza con un conjunto de cinco pares de muestras metaméricas cuyos factores de radiancia espectral están disponibles. En primer lugar, se deben obtener los valores triestímulo de los cinco pares de muestras observadas bajo la fuente de luz que será evaluada. En teoría las coordenadas triestímulo deben ser idénticas para cada par de muestras puesto que son metámeros.

En un segundo paso se calculan las diferencias de color CIELAB entre cada pareja de muestras y se calcula el valor medio de las diferencias, de modo que el índice será $M_{ilm} = \Delta_{ab}^*$. Este índice se utiliza como medida de la calidad del simulador de luz diurna D65. El procedimiento permite utilizar los observadores CIE de 1931 o 1964, así como diferencias de color distintas a la fórmula CIELAB. El informe de calidad debe incluir estos detalles en ambos casos.

2.3 Instrumentación

Las medidas de color utilizadas en este trabajo se realizaron con un colorímetro tricromático. Este instrumento forma parte del instrumental básico del laboratorio de Colorimetría y proporciona valores triestímulo (o algún conjunto de coordenadas equivalente) de las muestras observadas. Las medidas de color se pueden realizar transformando los datos observados con otros instrumentos. Por ejemplo, un espectrofotómetro permite convertir espectros en valores triestímulo con procedimientos vistos anteriormente (Ecuación 2.14). Las observaciones de otros instrumentos, por ejemplo los espectroradiómetros, también podrían transformarse en información colorimétrica (Young, 1988).

En esta sección se describen las características de los colorímetros tricromáticos. Este instrumento posee las prestaciones necesarias para cumplir el objetivo de este trabajo, aunque también presenta limitaciones para afrontar aplicaciones más avanzadas. Cualquier tipo de procesamiento que requiera el análisis de espectros no podrá ser realizado con un colorímetro. La sencillez de manejo y la facilidad para integrarlo en el flujo de trabajo del Laboratorio de Suelos han sido factores determinantes para desarrollar este trabajo usando el colorímetro tricromático.

A lo largo de la historia el colorímetro ha evolucionado desde grandes aparatos óptico-mecánicos diseñados *ex profeso* para llevar a cabo experimentos de igualación de color, hasta los modernos dispositivos electrónicos de propósito más general.

Uno de los primeros colorímetros de propósito general, orientados al estudio del color de la luz del sol, fue descrito por Abney en su libro de 1891 (Figura 2.11). El autor se refiere al instrumento como fotómetro de color o aparato de parches de color. El objetivo de este instrumento era la comparación visual de dos colores mediante la proyección de dos parches de color contiguos y estaba inspirado en un instrumento diseñado anteriormente denominado fotómetro de Rumford (Abney, 1891).

Los elementos principales del aparato son:

- Sistemas de lentes L_1 , L_2 , L_3 , L_4 y L_5 .
- Colimador c.

- Cámara B.
- Espejo C.
- Disco rotatorio M.

Los rayos de luz (R) entran al sistema por la lente convergente L_1 . Los rayos procedentes de L_1 entran a continuación al colimador c por la ranura S_1 y son reconducidos por la lente L_2 hacia un conjunto de prismas P_1 y P_2 . Los rayos procedentes de los prismas se proyectan sobre una pantalla D donde existe una segunda ranura S_2 . La lente L_4 proyecta los rayos de luz sobre en el primer parche de color en la pantalla E para su examen por el observador.

El recorrido de los rayos que conforman el segundo parche coincide con el primer parche hasta la lente L_2 . Los rayos de luz en este caso se reflejan por el prisma P_1 y son dirigidos hacia el espejo C y redirigidos por la lente L_3 hacia la pantalla E. Este segundo parche se puede ajustar en luminosidad mediante el accionamiento de un disco giratorio M que permite oscurecer o aclarar los rayos de luz.

Es conveniente destacar que los sistemas de lentes proyectaban espectros completos de las luces analizadas. El análisis de luces “monocromáticas” era posible gracias al desplazamiento de las ranuras S_1 y S_2 que permitían aislar porciones de los espectros completos.

En los experimentos que condujeron a la definición de los espacios de color CIE 1931 RGB y XYZ se utilizaban colorímetros visuales para realizar las comparaciones de color en campos bipartitos. Estos colorímetros visuales eran modelos mejorados basados en el modelo de Abney.

El espacio de proyección de los haces de luz se encontraba separado para poder aislar la iluminación del color espectral a igualar (test) de la iluminación creada con la mezcla aditiva de los tres colores primarios. Las dos señales luminosas se dirigían mediante sistemas ópticos o mediante proyección al campo visual que se exponía en el espacio del observador. La complejidad de estos colorímetros visuales se puede apreciar en la Figura 2.12 tomada del trabajo original de MacAdam sobre las elipses de diferencia de color (MacAdam, 1942).

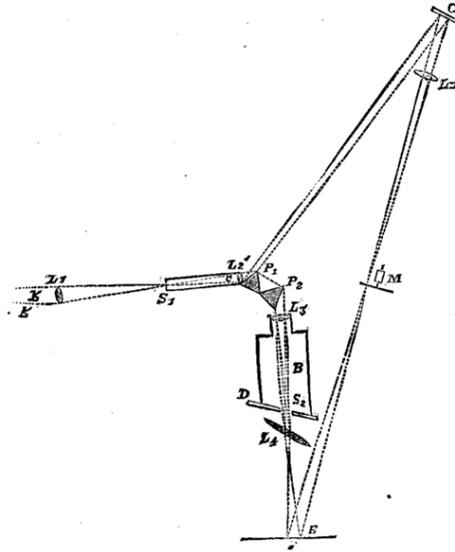


Figura 2.11: Esquema del fotómetro de color de Abney (1887)

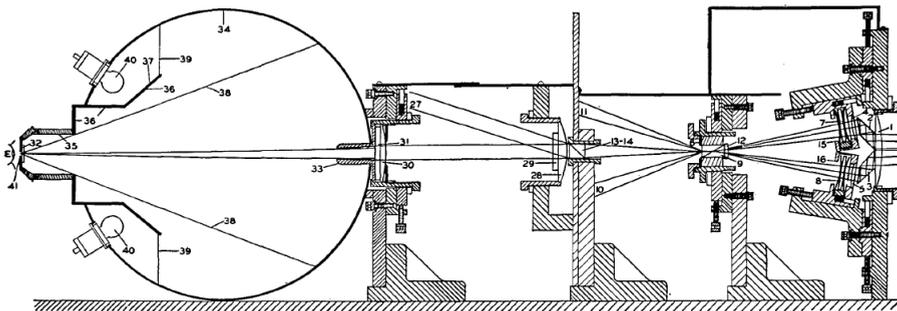


Figura 2.12: Sección vertical del aparato de discriminación cromática de MacAdam (1942)

El desarrollo en óptica de finales del siglo XIX y principios del siglo XX permitió fabricar modelos de tamaño reducido con aplicaciones a disciplinas distintas de la Óptica y la Física. Por ejemplo, el uso del colorímetro supuso un avance en los métodos analíticos usados en Medicina y en Química. Uno de los primeros modelos usados rutinariamente en Medicina fue el denominado colorímetro de tipo Duboscq (Figura 2.13). Su introducción supuso un impacto tal que algunos autores afirman que el desarrollo de la química analítica para aplicaciones clínicas comenzó con la introducción de los colorímetros. El primer uso de estos instrumentos fue el análisis cuantitativo de la creatinina en la orina en 1904 y su éxito supuso el desarrollo de más análisis basados en el color frente a los clásicos métodos volumétricos o gravimétricos para la detección de otros compuestos en la orina y en la sangre (Rosenfeld, 2002). En estos colorímetros el usuario observaba un campo circular dividido en dos mitades para comparar la similitud entre el color del líquido analizado y un estándar de referencia en una configuración similar a los campos bipartitos en los experimentos de igualación de color.

El Diccionario de Química de Henry Watts (1863) define el colorímetro de Duboscq de la siguiente manera (Warner, 2006):

“an instrument for measuring the depth of colour in a liquid by comparison with a standard liquid of the same tint”

Probablemente el colorímetro descrito en el diccionario era un prototipo anterior al lanzamiento comercial que se produjo en 1868 donde el fabricante se refería a él con la denominación *décolorimètre*.

Es conveniente destacar que en Química y Medicina la Colorimetría tiene sus características particulares que la distinguen de otras aplicaciones. Una diferencia fundamental es que el color de las muestras se suele medir mediante la radiación transmitida y no reflejada puesto que dichas muestras suelen ser disoluciones con una cantidad de soluto determinada. En este sentido, la colorimetría se define como la determinación de la concentración de una sustancia mediante la medición relativa de la luz transmitida a través de una muestra con una concentración conocida de esa sustancia (Mosby, 2012).

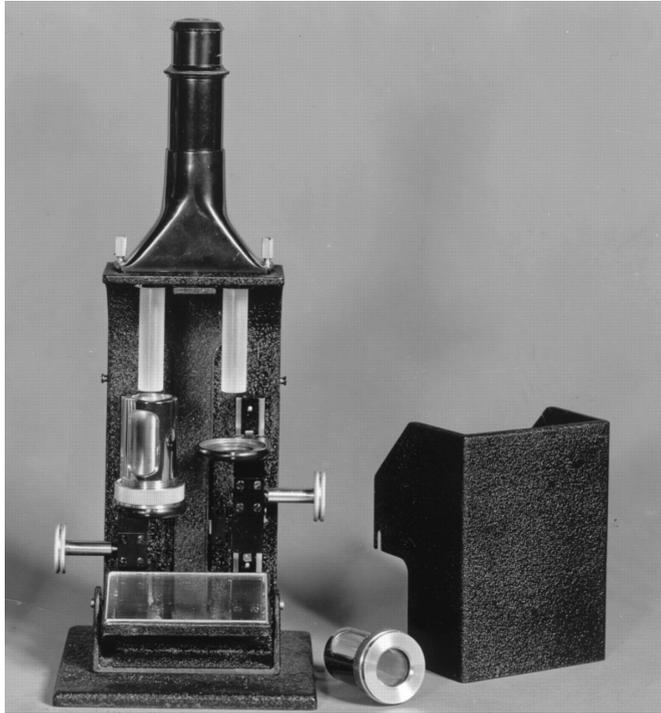


Figura 2.13: Colorímetro Duboscq

Colorímetros tricromáticos

La medición del color se enmarca dentro de un procedimiento más amplio denominado medición de la apariencia en el que se contempla la medición de atributos geométricos y atributos de color (Hunter and Harold, 1987). Los atributos geométricos incluyen brillo, textura o transparencia, mientras que los atributos de color incluyen los tres componentes ya conocidos: tono, saturación y luminosidad.

Actualmente las mediciones de color se realizan básicamente con dos tipos de instrumento: el colorímetro tricromático y el espectrofotómetro. El instrumento específicamente diseñado para medir el color es el colorímetro, aunque el espectrofotómetro permite obtener las coordenadas cromáticas de manera indirecta por procedimientos descritos anteriormente. Es habitual nombrar a esos instrumentos como espectrocolorímetros.

El espectrofotómetro también presenta diferencias fundamentales con respecto a otro

instrumento que puede ser usado en Colorimetría: el espectroradiómetro. Una de estas diferencias reside en el rango diferente de longitudes de onda que pueden procesar. El primero procesa longitudes de onda localizadas en el rango del espectro visible, normalmente entre 380 nm y 780 nm, mientras que el segundo tiene un rango más amplio que incluye el infrarrojo y el ultravioleta. Las unidades de trabajo de ambos instrumentos son asimismo diferentes. El espectroradiómetro mide magnitudes radiométricas absolutas o relativas, mientras que el espectrofotómetro mide la curva espectral que describe la distribución de la luz analizada a lo largo del espectro visible y es una magnitud fotométrica (Lee, 2005; Hunter and Harold, 1987).

En 1928 se utilizó el primer espectrofotómetro para mediciones de color. Sin embargo, debido a limitaciones de cálculo a la hora de convertir los espectros a valores triestímulo no resultaba el instrumento idóneo para la Colorimetría. En aquella época ya se había comenzado a trabajar en un instrumento capaz de imitar la espuesta del ojo humano ante los estímulos de luz.

Anteriormente, en 1915 se realizó el primer diseño de un instrumento denominado inicialmente reflectómetro triestímulo. En 1928 se presentó la primera patente para un colorímetro triestímulo y en 1938 se fabricó un colorímetro de cuatro filtros que proporcionaba directamente respuestas similares a las del observador estándar (Hunter and Harold, 1987).

Las primeras décadas del siglo XX sentaron las bases del diseño de los colorímetros triestímulo basados en filtros, muy en consonancia con los avances de la Colorimetría de la época. Los filtros utilizados en los primeros prototipos eran A (ámbar), G (verde) y B (azul). En algunos casos se añadía un cuarto filtro azul para representar mejor la zona azul de la función \bar{x} . Además, los colorímetros debían transformar las lecturas fotométricas a dimensiones cromáticas como por ejemplo coordenadas de cromaticidad xy , o en instrumentos más modernos a coordenadas CIELAB. Esta última característica es la que distingue un colorímetro de un reflectómetro (Hunter and Harold, 1987).

La Figura 2.14 presenta la disposición típica del colorímetro triestímulo para realizar las medidas de laboratorio. La luz procedente de la muestra pasa simultáneamente a

través de los filtros que, bien directamente o tras un sencillo cálculo proporciona valores triestímulo.

Las mejoras en este tipo de instrumentos desde los primeros tiempos se han centrado en la tecnología de los filtros para simular de la manera más precisa posible las respuestas del observador estándar. La posibilidad de utilizar filtros secuencialmente, en lugar de usar filtros simultáneamente en paralelo también ha ayudado a reducir el tamaño de los colorímetros.

Los colorímetros de los primeros tiempos pertenecían al grupo de los denominados telecolorímetros cuyas medidas se realizan sin entrar en contacto físico con la muestra observada (Figura 2.14). Los diseños actuales también incluyen colorímetros (o espectrofotómetros) de contacto que tienen ventajas y desventajas con respecto a los telecolorímetros.

La descripción completa de un experimento de colorimetría debe incluir la geometría de observación. Este parámetro indica la posición relativa entre la fuente o fuentes de iluminación, la muestra y el colorímetro. En los telecolorímetros el uso de geometrías distintas puede producir resultados distintos. La geometría conocida como $45^\circ/0^\circ$ (Figura 2.15) es la más habitual.

Existen dos modalidades de esta geometría denominadas direccional y circular (CIE, 2004). En la segunda las fuentes de luz están dispuestas en un anillo situado sobre la muestra de modo que la luz proviene de todas las direcciones. En contraposición, la geometría direccional dispone de una o dos fuentes de luz que proporcionan iluminación en un dirección determinada.

La geometría $45^\circ/0^\circ$ es la recomendada en muestras opacas con textura. Asimismo, en el caso de utilizar una geometría direccional es conveniente realizar al menos dos medidas y utilizar el promedio ya que la propia textura del espécimen observado puede producir medidas más dispersas (Hunter and Harold, 1987; Hunterlab, 2008)

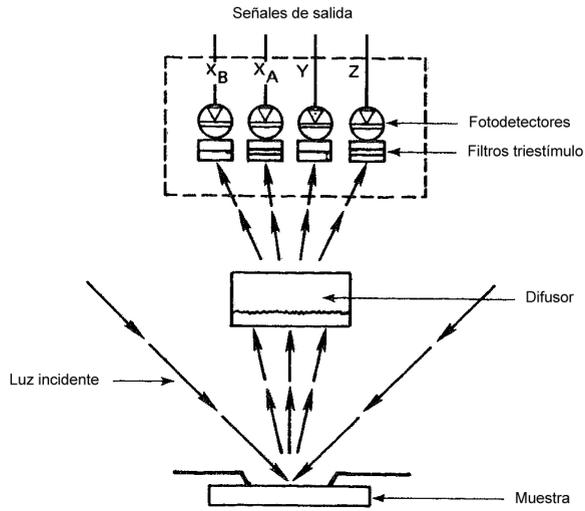


Figura 2.14: Esquema del colorímetro triestímulo

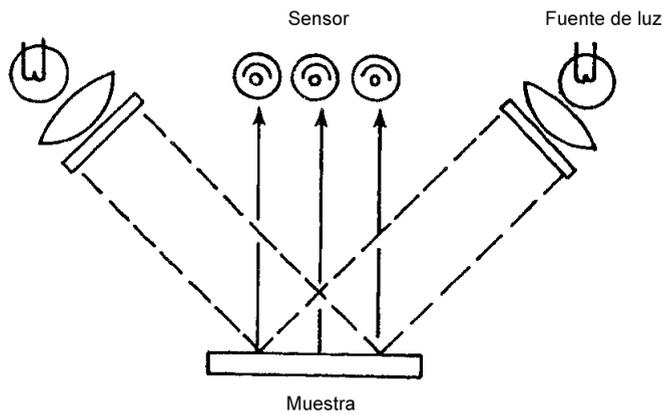


Figura 2.15: Geometría 45°/0° direccional

Colorímetro CS-100A

El instrumento que hemos utilizado en este trabajo es el modelo CS-100A de la firma Konica Minolta (1992). Es un instrumento ligero, portátil que permite realizar mediciones de color sin contacto con la muestra. El CS-100A proporciona la información cromática en el espacio Yxy . La cromaticidad se presenta en coordenadas de cromaticidad xy y la luminancia en valor triestímulo Y . Una curiosidad de este instrumento es que las unidades de luminancia se pueden configurar para dar salidas en cd/m^2 o en foot-lamberts.

Este instrumento permite realizar medidas absolutas o medidas de diferencia cromática en el espacio Yxy . La exactitud nominal de las medidas se cifra en un 2% para la luminancia y en 0.004 unidades de cromaticidad para las coordenadas cromáticas.

El uso recomendado del CS-100A se resume en los siguientes pasos:

1. Comprobar la batería
2. Conectar el instrumento y el sistema de iluminación
3. Ajustar el enfoque y el visor
4. Calibrar el instrumento en caso necesario
5. Tomar medidas

Es conveniente conectar tanto el instrumento como las fuentes de iluminación un mínimo de 30 minutos antes de proceder a las mediciones. Esto permite que todos los componentes alcancen su temperatura de operación. Entre las geometrías recomendadas está la $45^\circ/0^\circ$. Los iluminantes aceptados son el A, C y D65.

El CS-100A se complementa con dos componentes no incluidos en la configuración de serie: la lente de aumento No. 135 y el blanco de referencia CS-A20 (Figura 2.16). Estos dos elementos son necesarios para sacar todo el partido al instrumento. La lente de aumento No. 135 permite observar muestras muy pequeñas al reducir la distancia de enfoque. Los datos nominales indican que se pueden medir muestras con diámetros entre 5.2 y 8.7 mm de diámetro a distancias de enfoque entre 440 y 615 mm. El estándar de referencia CS-A20 se utiliza para trabajar con medidas de luminancia relativa, intercalando

entre varias medidas de color una medida del blanco. Este procedimiento permite también evitar “efectos memoria” en el instrumento.

El esquema electrónico del instrumento se corresponde con el diseño habitual de los colorímetros triestímulo clásicos (Figura 2.17). El estímulo luminoso atraviesa en primer lugar el sistema óptico. A continuación un dispositivo (*chopper*) reduce el rango espectral del estímulo a la parte visible y envía la señal de salida a un sistema de cable de fibra óptica que divide la señal en tres partes que son enviadas a su vez a tres sensores. Cada uno de estos tres sensores tiene asociado un filtro y un sistema electrónico que permiten procesar independientemente las tres señales del estímulo luminoso inicial.

Los filtros son un elemento fundamental en este instrumento, ya que están diseñados para ajustarse a las funciones de igualación de color $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ del observador estándar de 2°. Las tres señales luminosas filtradas son a continuación convertidas a señales eléctricas con un convertidos de voltaje y finalmente convertidas a señales digitales.

Las tres señales digitales son procesadas por un microprocesador que las presenta por la pantalla del instrumento, por la pantalla auxiliar del ocular y dependiendo de la configuración del instrumento también las envía a la salida de datos para su recolección por un sistema externo.

El cálculo de las funciones de igualación que se utilizarán para obtener las coordenadas de cromaticidad requieren un paso intermedio para la función \bar{x} . Este cálculo intermedio es necesario ya que el filtro de la función \bar{x} sólo es capaz de filtrar las longitudes de onda largas, mientras que la función de igualación tiene dos máximos en las zonas de longitud de onda largas y cortas (Figura 2.3). La función \bar{x} se obtiene finalmente como una combinación de la señal de los filtros \bar{x}_1 y \bar{z} , aprovechando la similitud entre la función \bar{z} y la parte de la función \bar{x} perteneciente a las longitudes de onda cortas. La combinación de las dos funciones se lleva a cabo con la siguiente expresión (Konica Minolta, 1992):

$$\bar{x}(\lambda) = \bar{x}_1(\lambda) + \bar{x}_2(\lambda) = K \cdot \bar{z}(\lambda) + \bar{x}_2(\lambda)$$

donde $\bar{x}_2(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ son las señales filtradas realmente por los filtros del instrumento. Se

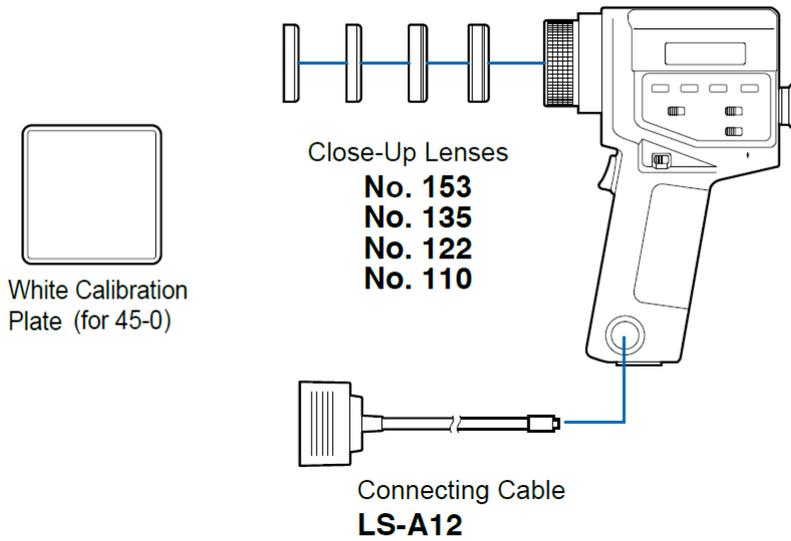


Figura 2.16: Diagrama de componentes del colorímetro CS-100A

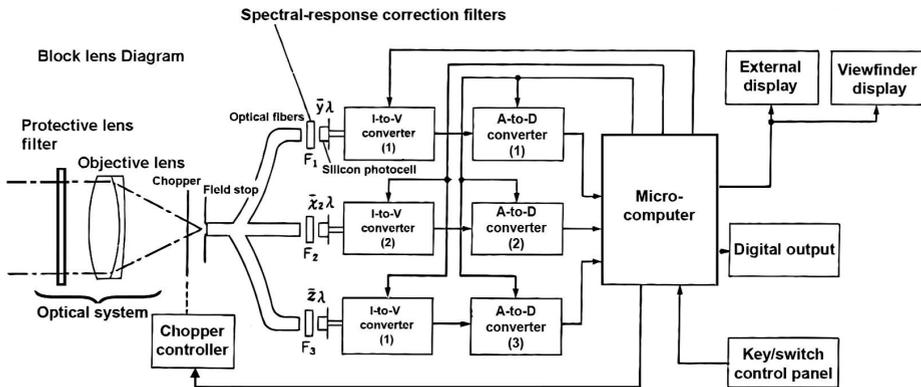


Figura 2.17: Esquema electrónico del colorímetro CS-100A

observa que la señal auxiliar $\bar{x}_2(\lambda)$ es en realidad la señal $\bar{z}(\lambda)$ a la cual se le ha aplicado un factor de escala k para simular la zona de longitudes de onda corta de la señal $\bar{x}(\lambda)$.

Una característica adicional de este instrumento es la posibilidad de conectarse a un ordenador o colector de datos. La conexión permite automatizar la recolección de las observaciones, acelerando el trabajo de laboratorio y almacenando los datos observados en formato digital. La mayoría de colorímetros actuales permiten este tipo de almacenamiento, bien a través de lecturas directas o bien mediante el almacenamiento temporal en memorias internas y posterior volcado al ordenador.

La mayoría de instrumentos también permiten la comunicación con sistemas de recolección de datos mediante programas específicos o bien mediante bibliotecas de funciones (*toolkits*). En ambos casos el usuario debe desembolsar un importe adicional para poder operar en modo automático.

El CS-100A en cambio dispone de la documentación técnica del protocolo de comunicación con dispositivos de comunicación externos (Minolta, 1992). Esta documentación permite desarrollar programas personalizados, totalmente integrados en el flujo de trabajo, con la posibilidad de almacenar los datos en los formatos requeridos para posteriores análisis y sin depender de programas o bibliotecas de terceras partes. Esta opción, flexible y adaptable a las necesidades del usuario ha sido la elegida en esta tesis y de hecho la disponibilidad de esta información ha resultado fundamental para desarrollar este trabajo en su totalidad.

La comunicación se realiza a través de un enlace serie RS-232C bidireccional. Este tipo de comunicación ha sido el más utilizado en comunicaciones serie hasta la llegada de los puertos USB. El cable de comunicación se denomina LS-A12 y dispone de un conector DB9 para su conexión con el ordenador y de un conector RP17-13RA-12SD para su conexión con el colorímetro. El conector DB9 es estándar en las conexiones serie de todo tipo de dispositivos, sin embargo el conector RP17-13RA-12SD es un dispositivo de 12 pins muy raro, específico para los colorímetros de Konica Minolta.

La comunicación por la salida RS-232C se activa manteniendo presionada la tecla F mientras se conecta el colorímetro. En la pantalla del instrumento aparecerá un indicador

con la letra C, lo cual confirma que las medidas se realizarán a través del cable RS-232C.

La configuración de la comunicación se debe establecer con los siguientes parámetros:

- Velocidad: 4800 baud
- Paridad: PAR
- Longitud: 7 bits
- Parada: 2 bits

El protocolo de comunicación está formado por una lista de 9 comandos (Tabla 2.7), aunque en nuestro caso sólo hemos utilizado el comando MES para obtener los valores de las mediciones. Los valores numéricos de las observaciones enviadas a través del puerto RS-232C tienen una cifra más que los valores presentados por la pantalla del instrumento. La cadena de datos típica de una medición es:

"MES: OK00, 121.5, .3325, .3565"

donde **OK00** es el código de error que indica que la medida se ha realizado con éxito. Otros posibles mensajes de advertencia son **OK13** que indica luminancias muy bajas, **OK11** que indica cromaticidades fuera de rango o **OK12** que indica luminancias muy altas. Algunos de los mensajes de error son **ER30** en caso de batería baja o **ER00** en caso de enviar un comando incorrecto.

Tabla 2.7: Comandos del colorímetro CS-100A

Comando	Descripción
MES	Realiza una medida de color y la envía a través del puerto RS-232C
MDS	Establece parámetros de configuración
CLE	Limpia la memoria
RCR	Recalcula diferencias de color
TDR	Proporciona el valor de referencia para futuras medidas de diferencia de color
UCR	Proporciona el valor usado en la calibración
TDS	Establece el valor almacenado en memoria como valor de referencia para medidas de diferencia de color
TDW	Almacena el valor de referencia para diferencias de color en la memoria
UCW	Almacena el valor de referencia para la calibración en la memoria

Capítulo 3

Bases de Datos Espaciales

3.1 Introducción

Las bases de datos espaciales (BDE) han experimentando un gran desarrollo en los últimos tiempos debido sobre todo a aplicaciones con gran volumen de datos (Samet, 1989; Rigaux et al., 2002; Manolopoulos et al., 2005; Gandhi et al., 2008; Mamoulis, 2012) y a la aparición de los denominados servicios basados en la posición o *location-based services* (LBS) en su denominación habitual en la bibliografía (Gartner and Rehl, 2009; Ferraro and Aktihanoglu, 2011).

Las aplicaciones agronómicas no han sido ajenas a este desarrollo como demuestra la extensa bibliografía existente sobre cartografía de suelos (Boettinger et al., 2012; Viscarra Rossel et al., 2010), geoestadística (Webster and Oliver, 2007; Oliver, 2010), o sistemas de información geográfica (Burrough and McDonnell, 1998; Worboys and Duckham, 2004; Grundwald, 2006) donde las aplicaciones agronómicas aparecen regularmente. En todas estas aplicaciones aparece explícita o implícitamente el concepto de base de datos espacial.

Una BDE es un conjunto de datos que representa las propiedades espaciales, y en ocasiones temporales, de algún fenómeno que tiene lugar en el mundo real (Bédard, 1999). Es importante destacar que el concepto BDE se refiere a los datos y no está ligado a los sistemas utilizados en la gestión, a las tecnologías de almacenamiento ni al formato de fichero de los datos. Asimismo, es importante aclarar que en el contexto de este trabajo el concepto BDE es sinónimo de otro concepto similar denominado base de datos geográfica

(BDG). Las diferencias entre estas dos denominaciones desaparecen si tenemos en cuenta que el espacio en el cual se desarrollan los fenómenos de interés agronómico es el propio espacio geográfico (Güting, 1994). En el presente trabajo se ha mantenido la denominación BDE para incluir tanto los levantamientos agronómicos representados en sistemas de referencia típicamente geográficos o geodésicos, como los levantamientos representados en otro tipo de sistemas de coordenadas no estrictamente geográficos o geodésicos, como por ejemplo los sistemas de coordenadas locales que aparecen habitualmente en los levantamientos a nivel de parcela.

Una BDE puede ser implementada en una variedad de entornos de trabajo. Entre estos entornos están los SIG, los sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD) combinados con sistemas de gestión de bases de datos (DBMS), los motores de cálculo espacial accesibles a través de interfaces de programación, los servidores web con visores espaciales, o los DBMS con extensiones de análisis espacial (Bédard, 1999). En el caso de esta tesis el entorno de interés, tal y como indica el título, es el entorno SIG.

La implantación de una BDE requiere una fase previa de análisis y diseño. El análisis consiste en la descripción y la comprensión precisas de las necesidades del usuario, lo cual se traducirá en una serie de especificaciones que la BDE deberá cumplir para ser operativa. Por otra parte, el diseño es la materialización o implementación de los requerimientos procedentes de la fase de análisis en un determinado marco tecnológico.

La implementación hace uso de modelos o representaciones de la realidad con un cierto grado de abstracción. En ocasiones el modelo se refiere al resultado final de la implementación, incluyendo los objetos que componen la BDE, junto con los procesos, las propiedades y las relaciones existentes entre ellos. La correcta planificación de la fase de diseño determinará en buena manera la facilidad de gestión en la fase final de operación. Esto es especialmente cierto en BDE complejas con muchos componentes y con gran interacción entre ellos. En tales casos es especialmente importante prestar atención a ciertos aspectos de los datos como geometría, sistemas de referencia espacial, precisión, integración espacial, metadatos, versionado o calidad.

El objetivo de esta tesis no es realizar un análisis y diseño detallado de una base

de datos, sino proporcionar datos del color del suelo espacialmente distribuidos sobre el terreno. Estos datos espaciales, materializados como objetos geográficos, deberán ser integrados en aplicaciones y modelos de cálculo dependiendo de las necesidades del usuario final. Ese usuario final será quien realice el análisis y diseño completo de la BDE. Los detalles de las herramientas de diseño, así como algunos ejemplos de implementación se pueden consultar en la bibliografía (Bédard, 1999; Gandhi et al., 2008), aunque quizá las características de las BDE del color del suelo no queden plenamente reflejadas en estas referencias.

En nuestro caso particular podemos suponer que las BDE que integrarán datos sobre el color del suelo poseen las siguientes características:

- En general las BDE poseen un nivel de complejidad reducido.
- Las muestras de suelo se pueden representar convenientemente con objetos geográficos de dimensión topológica cero, es decir, objetos de tipo punto.
- La información colorimétrica se puede almacenar convenientemente con atributos de tipo texto o numérico, dependiendo del espacio de color utilizado.
- La BDE contiene datos vectoriales y datos raster.
- La BDE contiene datos analíticos procedentes del Laboratorio de Suelos que deberán ser asociados a los datos espaciales mediante operaciones de enlace de tablas.
- El entorno típico de trabajo será un Sistema de Información Geográfica

Los temas de investigación más relevantes en el estudio de las BDE se pueden resumir en los siguientes puntos (Gandhi et al., 2008):

1. Marco matemático
2. Índices y organización de ficheros
3. Procesamiento de consultas
4. Modelo de datos lógico y conceptual
5. Lenguajes de consulta
6. Minería de datos espaciales

Los tres primeros puntos se sitúan en el nivel más bajo del procesamiento, donde se manipulan y modifican físicamente los datos. Normalmente, el usuario final no es consciente de este nivel de procesamiento. Los modelos de datos (punto 4) se han introducido brevemente y son un punto fundamental para el diseño eficiente de la BDE. Sin embargo en nuestro caso es un punto en cierto modo secundario debido a la simplicidad las BDE utilizadas en estudios del color del suelo.

Los dos últimos puntos sí que son realmente importantes para el usuario final, interesado principalmente en obtener resultados tras el procesamiento de los datos mediante modelos numéricos específicos. Los lenguajes de consulta son fundamentales para el pre-procesamiento y filtrado de los datos, permitiendo la depuración de los mismos hasta su forma final. Probablemente el punto de mayor interés para las aplicaciones agronómicas es el último y de hecho es uno de los últimos temas que ha atraído la atención de la comunidad científica (Gandhi et al., 2008). En nuestro caso es así y en el Laboratorio de Suelos de la UPV hemos comenzado a aplicar técnicas estadísticas para descubrir cuales son los factores de formación y las variables geomorfológicas, edáficas y agronómicas que influyen en el color del suelo agrícola (Marqués-Mateu et al., 2012).

3.2 Sistemas de Información Geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) es “un conjunto de herramientas destinadas a recolectar, almacenar, recuperar, transformar y representar datos espaciales procedentes del mundo real” (Burrough and McDonnell, 1998).

Esta definición describe un conjunto de herramientas orientadas a la gestión de la información. Existen otras definiciones que se basan en otros aspectos como el propio sistema de gestión de los datos, la organización que hace uso del sistema o los componentes del mismo. Rodríguez Pascual (1993) recopiló 12 definiciones existentes estudiando sus puntos fuertes y débiles y propuso la siguiente definición profunda de SIG:

“Modelo informatizado del mundo real, descrito por un sistema de referencia ligado a la tierra, establecido para satisfacer unas necesidades de información específicas respondiendo a un conjunto de preguntas concreto”

Existe un elemento común a todas las definiciones: la información que indirectamente nos lleva a los datos geográficos. Es evidente que sin datos no existiría la información, y sin información no existiría el sistema de información.

Por otra parte, el concepto SIG se puede interpretar como una disciplina o ciencia aplicada, como un proyecto o realización concreta de la disciplina o como un producto, herramienta o conjunto de programas de aplicación. En este capítulo se hará referencia a estas tres facetas del término SIG que quedarán definidas por el contexto.

Esta ambigüedad generó en el pasado un gran debate sobre lo que era realmente un SIG: herramienta o disciplina científica (Wright et al., 1997). En la actualidad la disciplina se ha convertido en una ciencia aplicada reconocida hasta el punto que en la bibliografía (en inglés) las siglas GIS ya no responden únicamente a *Geographic Information System*, sino a *Geographic Information Science* (Wright et al., 1997; Goodchild, 2010).

La enumeración de los elementos imprescindibles en un SIG en su sentido más amplio puede contribuir a fijar ideas. Estos elementos básicos serían (Burrough and McDonnell, 1998; Worboys and Duckham, 2004; Longley et al., 2005):

1. Información. La estructuración y procesamiento de los datos de entrada iniciales permite cambiar el estado del conocimiento sobre un determinado fenómeno. En el caso de un SIG la información está espacialmente referenciada.
2. Dispositivos físicos. La captura y almacenamiento de datos se debe llevar a cabo con distintos tipos de dispositivo.
3. Dispositivos lógicos. Las herramientas de procesamiento se materializan en programas de aplicación específicos.
4. Usuarios. El usuario del sistema es el destinatario final de la información con la cual podrá tomar decisiones apropiadas.

Parece evidente que un SIG constituye un entorno de trabajo adecuado (aunque no el único como vimos anteriormente) para la creación y mantenimiento de una BDE del color del suelo, así como para el procesamiento de sus datos. Las ventajas de este entorno frente a otros es la relativa facilidad de aprendizaje para el usuario.

El uso de herramientas de análisis y la terminología se convierten pronto en parte de las capacidades del usuario interesado en el procesamiento de datos espaciales. La

posibilidad de personalización y geoprocésamiento constituyen un nivel de conocimientos más avanzado. Los SIG también presentan ciertas desventajas frente a otros sistemas, principalmente en aplicaciones con BDE grandes o distribuidas en red. En estos casos es necesario valorar la posibilidad de usar entornos de trabajo distintos, para lo cual es necesario aumentar el equipo humano encargado de diseñar y explotar la BDE.

Las herramientas disponibles en un entorno SIG se pueden clasificar en grupos afines mediante lo que algunos autores han denominado la taxonomía de las operaciones SIG (Albrecht, 1998). El conjunto se puede reducir a un número de 20 operaciones universales que combinadas entre sí permiten realizar cualquier tipo de análisis SIG (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Operaciones SIG Universales (Albrecht, 1998)

Análisis	Operaciones SIG
Búsqueda	Interpolación, búsqueda espacial, búsqueda temática, reclasificación
Ubicación	Área de influencia (<i>buffer</i>), corredores, superposición (<i>overlay</i>), polígonos de Thiessen o Voronoi
Terreno	Pendiente/orientación, cuencas hidrológicas, redes de drenaje, cuencas visuales
Distribución	Coste/difusión, proximidad, búsqueda de vecinos más próximos
Espacial	Análisis multivariante, patrones, conectividad, forma
Mediciones	Mediciones (longitud, área, volumen, etc.)

Es fácil argumentar que la lista de la Tabla 3.1 no es completa. Por ejemplo, las operaciones de triangulación o de gestión de redes no están incluidas. El autor lo reconoce en su trabajo, aduciendo que se trata de operaciones que se pueden realizar como combinaciones de las operaciones presentes en la tabla y que dada su especialización no tienen un carácter universal. En ciertos entornos de trabajo debería haber categorías de análisis específicas para estas operaciones especializadas.

A pesar de las posibles omisiones y sin entrar a valorar las consecuencias que puede tener la clasificación de funciones en el interfaz de usuario de un SIG podemos considerar las necesidades analíticas de una BDE del color del suelo según la clasificación anterior.

La explotación de la BDE del color del suelo requiere comandos para realizar análisis de búsqueda, ubicación, terreno, espacial y mediciones. El análisis espacial multivariante

es probablemente el más interesante para estudiar las relaciones entre el color del suelo y otros parámetros del terreno. Las operaciones de búsqueda temática y espacial, superposición, cálculo de pendientes y orientación, proximidad y de medición de valores son también necesarias para la gestión rutinaria de la BDE.

En cuanto al aspecto práctico, las aplicaciones posibles de una BDE del color del suelo son múltiples. En el Laboratorio de Suelos hemos obtenido relaciones estadísticas entre el color y los factores formadores del suelo y otras variables agronómicas (Apéndice B). En la bibliografía existen aplicaciones para cartografiar el carbono orgánico del suelo (Chen et al., 2000), el nivel freático (Gertal and Hall, 1990) y también aplicaciones de teledetección (Escadafal et al., 1988; Escadafal, 1989; Escadafal and Huete, 1992; Qi et al., 1994; Mathieu et al., 1998) y estudios a nivel de levantamiento de suelos (Gunal et al., 2008) donde se utiliza el color del suelo como variable auxiliar.

3.3 Datos espaciales

Los datos espaciales son fundamentales para la implementación de cualquier BDE. Su importancia no es únicamente conceptual y práctica. Algunos autores estiman que el coste económico de la recolección de datos representa entre el 15% y el 50% del coste total del proyecto (Longley et al., 2005). Es por tanto necesario ajustar al máximo los recursos destinados a la recolección de datos, intentando aprovechar conjuntos de datos distribuidos gratuitamente o a bajo coste, siempre y cuando se adapten a nuestros objetivos.

En el Apartado 3.1 se comentaron las características más destacadas de una BDE para el estudio del color del suelo. Entre estas características está la presencia de datos vectoriales y datos raster, así como datos analíticos que en principio no están directamente georreferenciados.

Los términos vectorial y raster son ampliamente utilizados en la terminología SIG y hacen referencia a dos modelos de datos espaciales, dos conceptualizaciones distintas del mundo real (Burrough and McDonnell, 1998; Worboys and Duckham, 2004). En el modelo vectorial los objetos espaciales son representados explícitamente mediante coordenadas, mientras que en el modelo raster los objetos se definen implícitamente en base

a una división del espacio en celdas. Es habitual referirse a estos modelos como modelos basados en objetos (vectorial) y modelos basados en campos (raster).

En el caso particular del modelo vectorial las tres primitivas gráficas utilizadas para representar los datos son el punto, la línea y el polígono. Asimismo, sus tres componentes fundamentales son: posición, topología y atributos (Burrough and McDonnell, 1998), de modo que la posición fija un elemento en el espacio, la topología indica la dimensión de los propios objetos así como las relaciones espaciales entre ellos, y los atributos representan las características no espaciales de los objetos.

Una cuestión fundamental para el correcto desarrollo de cualquier disciplina es la creación de normas o estandarización. En el caso particular de las tecnologías de la información geográfica las tareas de normalización son coordinadas por el Comité Técnico 211 de la ISO (ISO/TC 211 *Geographic Information/Geomatics*). Los organismos que llevan a cabo la publicación de normas son el ISO/TC 211, el *Open Geospatial Consortium* (OGC) y el *World Wide Web Consortium* (W3C). La distribución de tareas se lleva a cabo en grupos de trabajo, algunos de los cuales están actualmente disueltos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Grupos de trabajo del ISO/TC 211

Grupo	Tema
1	Marco y modelo de referencia
2	Modelos y operadores geoespaciales
3	Administración de datos geoespaciales
4	Servicios geoespaciales
5	Perfiles y estándares funcionales
6	Imágenes
7	Comunidades de usuarios de la información
8	Servicios basados en la posición (location-based services)
9	Gestión de la información
10	Acceso público ubícuo

Las normas referentes a la información geoespacial se designan genéricamente como familia ISO 19000, siendo especialmente relevantes en este trabajo las normas ISO 19104 (Terminología), ISO 19111 (Referenciación espacial con coordenadas), ISO 19115 (Metadatos), ISO 19125 (acceso a elementos simples) y ISO 19136 (GML).

Algunas de estas normas ISO son también estándares OGC, por ejemplo la norma ISO 19125 se corresponde con los estándares OGC 06-103r4 (OGC, 2010) y OGC 06-104r4 (OGC, 2007). En estas normas se especifican las dimensiones topológicas de los objetos, métodos aplicables, relaciones espaciales, y las características de las geometrías y tablas de atributos.

Los datos del color del suelo requieren una representación muy sencilla consistente en un mapa de puntos que representa los puntos de muestreo con una tabla de atributos asociada (Figura 3.1). En terminología OGC los puntos se corresponden con objetos geográficos de dimensión topológica 0, que son los más sencillos. En el caso de datos puntuales las relaciones topológicas también se simplifican y de hecho la propia posición del punto contiene toda la información necesaria para saber sus relaciones espaciales con otros objetos.

En los estudios sobre el color del suelo, además de los propios datos sobre el color, deben incluirse conjuntos de datos adicionales como por ejemplo imágenes aéreas, datos topográficos, datos geológicos, datos geomorfológicos, datos meteorológicos, datos de cultivos o datos de manejo del suelo. En la Tabla 3.3 se muestran las principales conjuntos de datos de interés en Agronomía, incluyendo la manera de obtenerlos para incluirlos en la BDE.

Los datos reseñados en la Tabla 3.3 se pueden obtener de manera regular a través de sus respectivos organismos. Además de estos datos, existen otros conjuntos de datos cartográficos que han sido creados a partir de distintas iniciativas o proyectos de investigación. La presentación de estos datos es muy heterogénea en cuanto a escala, extensión, soporte y formato de datos.

Algunos ejemplos son la serie de mapas del proyecto LUCDEME, el mapa de niveles erosivos del antiguo ICONA (tanto a nivel nacional a escala 1:1000000, como a nivel de cuenca), el inventario nacional de erosión de suelos del MAGRAMA o algunas de las series de cartografía temática de la COPUT.

Las series anteriores se agrupan genéricamente bajo la denominación “cartografía de suelos”, la cual como vemos puede incluir cartografía muy diversa. En Europa se han

Tabla 3.3: Datos espaciales de interés en Agronomía

Organismo	Datos
CNIG	Las ortofotos con resolución de 0.5 m, los MDT con resoluciones de 5 m y 25 m y la cartografía topográfica a escalas 1:25000 y 1:50000 están disponibles para la descarga gratuita previa suscripción.
TERRASIT	El MDT con resolución de 1 m y la cartografía topográfica 1:10000 de la Comunidad Valenciana está disponible para la descarga gratuita previa suscripción
AEMET	Hasta octubre de 2012 los datos meteorológicos registrados por la red de AEMET estaban disponibles gratuitamente.
IGME	El mapa geológico 1:50000 (serie MAGNA) está disponible a un precio de 30 €/hoja. También hay otras series cartográficas a escalas menores.
MAGRAMA	El mapa de cultivos y aprovechamientos 1:50000 se distribuye a través de la tienda virtual del Ministerio a un precio de 6.01 €/hoja. Los datos agrometeorológicos registrados por la red de estaciones del sistema de información agroclimática para el regadío (SIAR) están disponibles gratuitamente.

puesto en marcha iniciativas para sistematizar la recopilación de datos sobre el suelo y su posterior almacenamiento en una base de datos. La totalidad de la información relacionada con la cartografía de suelos se centraliza en el portal europeo de suelos EUSOILS.

Algunas de las iniciativas más destacadas son el MEUSIS (*Multi-Scale European Soil Information System*) y el EuDASM (*European Digital Archive of Soil Maps*). Como curiosidad podemos citar que el EuDASM lista 47 mapas de suelos para España. La colección es muy heterogénea e incluye mapas topográficos, geomorfológicos y de suelos de distintas escalas. Algunos de los mapas cubren todo el país, otros cubren la extensión de una hoja a escala 1:50000 y otros cubren zonas específicas a nivel de comunidad autónoma o provincial.

Esta situación en la cual se fusionan datos cartográficos procedentes de distintas fuentes requiere especial atención para evitar incoherencias en los resultados. El término utilizado para referirse a la acción de integrar datos procedentes de múltiples fuentes es interoperabilidad. El concepto de interoperabilidad alude a los procesos que permiten trabajar juntas a distintas organizaciones con el objetivo de obtener beneficios y cumplir

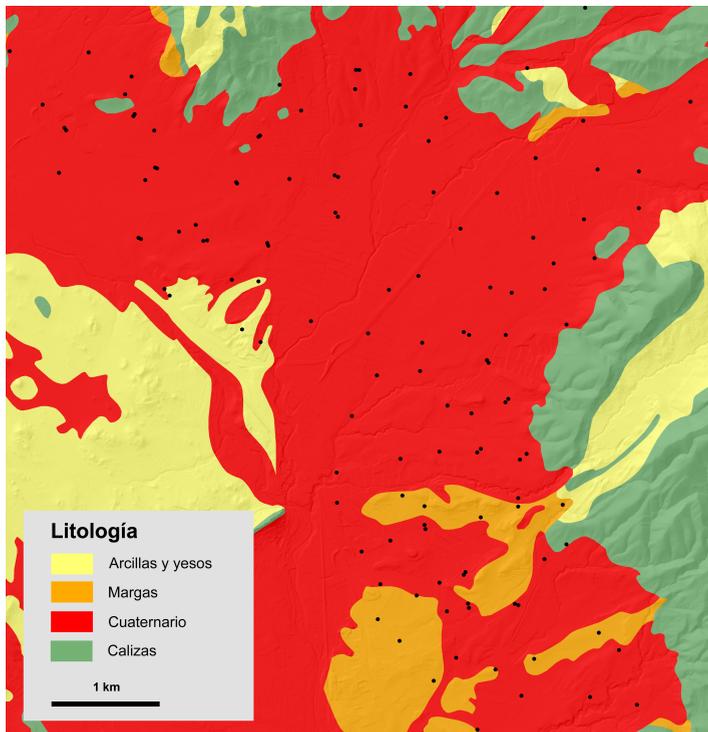


Figura 3.1: Mapa de puntos de muestreo sobre mapa litológico (Sax)

objetivos comunes (EC, 2012). En un sentido técnico la interoperabilidad se refiere a algo más concreto como el intercambio de información entre distintos sistemas.

En el caso particular de los datos cartográficos la implantación de procedimientos y herramientas de interoperabilidad se deriva de la proliferación de infraestructuras de datos espaciales (IDE). La Unión Europea publicó en 2007 la directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea “por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (INSPIRE)” (EU, 2007).

La directiva, en su artículo 3, proporciona la siguiente definición: *‘infrastructure for spatial information’ means metadata, spatial data sets and spatial data services; network services and technologies; agreements on sharing, access and use; and coordination and monitoring mechanisms, processes and procedures, established, operated or made available in accordance with this Directive.*

Tabla 3.4: Definiciones de INSPIRE

Concepto	Definición
Dato espacial	Cualquier dato que, de forma directa o indirecta, haga referencia a una localización o zona geográfica específica
Conjunto de datos espaciales	Recopilación identificable de datos espaciales
Servicios de datos espaciales	Operaciones que puedan efectuarse, a través de una aplicación informática, sobre los datos espaciales contenidos en dichos conjuntos de datos o en los metadatos correspondientes
Objeto espacial	Representación abstracta de un fenómeno real que corresponde a una localización o zona geográfica específica
Metadatos	Información que describe los conjuntos y servicios de datos espaciales y que hace posible localizarlos, inventariarlos y utilizarlos
Interoperabilidad	Posibilidad de combinación de los conjuntos de datos espaciales y de interacción de los servicios, sin intervención manual repetitiva, de forma que el resultado sea coherente y se aumente el valor añadido de los conjuntos y servicios de datos

El objetivo primordial de INSPIRE es la creación de IDE interoperables a nivel local, nacional y europeo. Para ello la directiva define de manera precisa conceptos clave entre los cuales están los contenidos en la Tabla 3.4.

Un ejemplo práctico de interoperabilidad de datos es la superposición de las muestras de suelo sobre un mapa geológico o sobre un modelo digital del terreno (Figura 3.1) para obtener las relaciones existentes entre el color y los factores formadores del suelo. Esta operación, similar al operador relacional *Touches* en terminología OGC, es sencilla en sí misma, pero se complica cuando los sistemas de referencia son distintos tal y como pasó con los datos reales. En este caso el usuario debe ejecutar las conversiones pertinentes o proveer los metadatos necesarios para que los programas de procesamiento tengan en cuenta los distintos sistemas de referencia y realicen la alineación de datos correctamente.

Recolección de datos

En ocasiones la confección completa de la BDE no es posible con datos ya existentes como los reseñados en la Tabla 3.3. En estos casos es necesario destinar parte de los recursos a realizar tareas de recolección de datos. El caso del color del suelo es un ejemplo claro en el cual la recolección de datos es necesaria y además requiere una planificación adecuada debido al propio flujo de trabajo.

La recogida de muestras de suelo precisa de visitas a campo. Este trabajo de campo consiste en la toma de muestras de suelo y la recolección de diversas variables referidas a cada muestra (Figura 3.2). La posición geográfica es probablemente la variable más evidente, pero también es necesario recolectar datos como la pedregosidad, cultivo o prácticas culturales.



Figura 3.2: Recolección de muestras de suelo en campo con barrena

Posteriormente, en el laboratorio la muestra debe ser procesada para obtener por una parte el color y por otra parte las variables analíticas del suelo. Esto requiere recolectar suficiente material para poder fraccionar la muestra para estos dos análisis, que además se llevan a cabo en entornos y escalas de tiempo diferentes.

La fase final consiste en combinar la información espacial (las coordenadas de los puntos de muestreo) con la información de color y los resultados analíticos. En este sentido la experiencia nos dice que la opción más práctica es crear un mapa de puntos únicamente con información del color y enlazar posteriormente los datos analíticos mediante enlaces relacionales de tablas.

La obtención de coordenadas es una cuestión especialmente importante en los levantamientos de datos del suelo. A lo largo del tiempo se han obtenido con procedimientos aproximados como por ejemplo leer directamente las coordenadas de un mapa existente o mediante el uso de cuadrículas. En la actualidad la mejor opción es utilizar sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS) por la rapidez y comodidad de uso, así como por la precisión que proporcionan (Marqués et al., 2006). La precisión de las coordenadas depende del tipo de equipo utilizado, pudiendo variar desde varias decenas de metros en receptores de mano (DePriest, 2003) hasta precisiones centimétricas en equipos geodésicos (Seeber, 2003).

Sistemas de referencia

Un último aspecto de los datos espaciales es el sistema de referencia en el cual se representan las coordenadas espaciales. Esta cuestión es particularmente importante en España donde actualmente coexisten dos sistemas de referencia: ED50 y ETRS89.

Un sistema de referencia espacial o geográfico se define como “un sistema para referenciar de manera única la información espacial como un conjunto de coordenadas (X, Y, Z) y/o latitud, longitud y altura sobre un datum horizontal y vertical” (EU, 2007).

El Real Decreto 1071/2007 de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España, es el texto legal de referencia en cuanto a sistemas de referencia espaciales (BOE, 2007). El Ministerio de Fomento ha recopilado toda la in-

formación relevante sobre cuestiones relacionadas con la transición del datum ED50 a ETRS89 en la página del Consejo Superior Geográfico.

En el contexto de esta tesis hemos tenido en cuenta el problema del cambio de datum, cuantificando los errores de alineación debidos a la elección incorrecta del sistema de referencia (Marqués Mateu et al., 2006). Los errores de alineación se traducen en desplazamientos horizontales de 204 m en la zona de Sax, Alicante (Figura 3.3). En caso de trabajar con datos representados en dos sistemas de referencia distintos será necesario aplicar métodos de transformación clásicos basados en traslaciones, rotaciones y cambios de escala (Seeber, 2003) o bien métodos más modernos y precisos basados en rejillas de transformación NTV2 (Junkins and Farley, 1995). En ocasiones el entorno de trabajo del SIG permite realizar estas transformaciones con intervención mínima del usuario si se preparan convenientemente los metadatos.



Figura 3.3: Desplazamiento debido a la especificación del datum

Una vez definido un sistema de referencia común a todos los datos, las posiciones espaciales se pueden representar numéricamente mediante coordenadas geográficas longitud (λ) y latitud (ϕ), o mediante coordenadas proyectadas. En la práctica es mucho más habitual usar coordenadas proyectadas que coordenadas geográficas. En 1970 se es-

tableció la proyección UTM como sistema de representación oficial para la edición del Mapa Topográfico Nacional (BOE, 1970). La formulación matemática para convertir coordenadas geográficas en coordenadas UTM está bien documentada en la bibliografía, tanto la aproximación rigurosa basada en funciones complejas como otras aproximaciones alternativas (Rossignoli Just et al., 1976; Martín Asín, 1990).

Los documentos derivados de la directiva INSPIRE establecen además de los sistemas de coordenadas geográficas y la proyección UTM, otros sistemas de referencia utilizados en aplicaciones modernas como por ejemplo las coordenadas geocéntricas tridimensionales, el sistema de referencia altimétrico EVRS o los sistemas de referencia temporales (INSPIRE, 2012; Annoni et al., 2003). En la documentación se distingue entre datum, que hace referencia al elipsoide GRS80 alineado con respecto a un triedro con origen en el centro de masas de la tierra, y los sistemas de referencia de coordenadas (CRS) que divide en tres conjuntos: sistemas de referencia tridimensionales, bidimensionales y compuestos (Tabla 3.5).

Tabla 3.5: Sistemas de referencia INSPIRE

Sistema	Ejemplo
Tridimensional	Coordenadas cartesianas tridimensionales Coordenadas geodésicas trisimensionales (ϕ , λ , h)
Bidimensional	Coordenadas geodésicas bidimensionales (ϕ , λ) Coordenadas planas en proyección Lambert equivalente (X, Y) Coordenadas planas en proyección Lambert conforme (X, Y) Coordenadas planas en proyección UTM (X, Y)
Compuesto	Componente horizontal definido en alguno de los sistemas de referencia bidimensionales Componente vertical en el sistema EVRS para la zona continental de Europa Componente vertical en sistemas basados en el campo de gravedad de la Tierra para zonas exteriores al dominio del EVRS

En la actualidad todos los sistemas de referencia se codifican con códigos EPSG únicos que además están recopilados en bases de datos disponibles en la Red. La Tabla 3.6 contiene los sistemas de referencia de coordenadas que cubren las provincias de Alicante y Valencia, incluyendo los códigos CRS-EU y EPSG.

Tabla 3.6: Sistemas de referencia

CRS-EU	EPSG	Descripción
ETRS89-LatLonh	4258	European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)
ETRS89-TM30	3042	ETRS89. Proyección UTM. Huso 30
ETRS89-TM31	3043	ETRS89. Proyección UTM. Huso 31
ES_ED50	4230	European Datum 1950 (ED50)
ED50/UTM30N	23030	ED50. Proyección UTM. Huso 30
ED50/UTM31N	23031	ED50. Proyección UTM. Huso 31
ES_ALIC/OH	5782	Alturas ortométricas referidas al nivel medio del mar en Alicante

3.4 Formatos de datos espaciales

La representación de datos espaciales o geográficos en ficheros físicos obliga al usuario a pasar del plano teórico al plano aplicado. No es suficiente con definir las dimensiones de los objetos, ni las relaciones entre ellos. Es necesario establecer una especificación clara y precisa para saber en primer lugar como almacenar ordenadamente los datos y en segundo lugar para saber como interpretarlos en posteriores operaciones de consulta.

En esta sección describimos las características de dos formatos de datos ampliamente utilizados en las aplicaciones prácticas: GML y Shapefile. El formato GML es una especificación OGC para el almacenamiento e intercambio de datos espaciales orientado a la total interoperabilidad entre sistemas y plataformas. El formato Shapefile es de origen comercial pero se ha convertido en un estándar *de facto* y probablemente es el más utilizado en la actualidad.

Formato GML

El formato GML (*Geography Markup Language*) es “una codificación XML compatible con la norma ISO 19118 para el transporte y almacenamiento de la información geográfica, la cual se modela de acuerdo al marco conceptual establecido en la familia de normas ISO 19100, incluyendo las propiedades espaciales y no espaciales de los elementos geográficos” (Cox et al., 2004).

Esta definición formal requiere ejemplos más concretos para poder entender el potencial del formato. En esta sección se describirá brevemente el formato GML comenzando con los aspectos básicos del lenguaje XML a partir de un ejemplo tomado de los datos de las muestras de una zona de trabajo localizada en Sax (Alicante).

El formato GML es en realidad código XML (*Extensible Markup Language*). XML es un lenguaje basado en etiquetas (*tags*) orientado a la definición de contenidos. La gran diferencia entre XML y otros lenguajes de etiquetas es que no existe un conjunto predefinido de etiquetas, es el usuario mismo quien define sus propias etiquetas. Este enfoque permite adaptar el lenguaje a cualquier necesidad de almacenaje.

Existen dos grandes grupos de aplicaciones para la gestión de código XML: aplicaciones orientadas al procesamiento o aplicaciones orientadas la generación de código XML. En el caso de esta tesis el interés se centra en la generación de información XML para codificar los análisis colorimétricos realizados en el Laboratorio de Suelos junto con la posición geográfica de las muestras analizadas.

Asímismo, los dos usos principales del formato XML son la publicación y el intercambio de información (Marchal, 2000). Es importante destacar que este formato no define la representación de la información, sino la estructura misma de los documentos. La representación de la información requiere complementos a XML como por ejemplo XLS (*XML Style Language*) o CSS (*Cascade Style Sheet*). El formato XML cuenta además con otros complementos necesarios para la la gestión y el acceso a datos distribuidos:

- XML Namespaces. Los “espacios de nombres” son un mecanismo para definir etiquetas sin interferir con otras definiciones existentes mediante prefijos.
- DOM y SAX. Son dos interfaces de programación para acceder a documentos XML. Estos interfaces son muy recomendables para gestionar información XML existente. En este trabajo su uso no es estrictamente necesario.
- XLink y XPointer. Son dos mecanismos que permiten crear relaciones entre documentos. Estos documentos pueden ser locales o pueden estar almacenados en red.

El contenido de un fichero XML está compuesto por datos y por etiquetas. Todo el contenido se representa como texto puro y por tanto es posible modificarlo con un editor de texto. Esta es una de las ventajas argumentadas por los defensores del formato XML. Sin

embargo, en el momento en que el número de datos a representar crece, el uso de un editor de texto se vuelve poco práctico y es preferible buscar formas de automatizar la escritura de datos con interfaces de programación. A continuación se realiza una breve descripción del formato XML (o GML) a partir del Listado 3.1, que contiene la salida producida por la librería GDAL/OGR. Los detalles de programación se encuentran en el Apéndice A.

En los documentos XML, la información se estructura con etiquetas que pueden ser definidas libremente por el usuario. Un fragmento de información debe ser delimitado por una etiqueta inicial y una etiqueta final. Las etiquetas son reconocibles fácilmente porque van encerradas entre los símbolos <>. El ejemplo siguiente contiene un elemento de tipo `gml:X` cuyo valor es `691327.39`.

```
<gml:X>691327.39</gml:X>
```

El uso de las etiquetas inicial y final es obligatorio y la omisión de cualquiera de las dos es de hecho uno de los errores más comunes al escribir datos en formato XML. En el ejemplo previo la etiqueta inicial es `<gml:X>` y la final `</gml:X>`.

El elemento `gml:X` se utiliza lógicamente para almacenar la coordenada X de un punto en el espacio. La etiqueta tiene dos campos separados por el símbolo `:`, el campo de la izquierda es el “espacio de nombres” y el de la derecha es la etiqueta propiamente dicha. La estructuración en espacios y etiquetas evita los conflictos con otras posibles definiciones previas de una etiqueta `X` localizada en otro espacio de nombres.

La línea `xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml"` introduce explícitamente el espacio `gml` cuya definición está en una dirección web. Este mecanismo permite el uso regular de dicho espacio en la composición del fichero de datos ya que los programas de procesamiento GML serán capaces de identificarlo al leer la línea de texto.

Se observa que todos los datos GML se agrupan bajo un elemento identificado por la etiqueta `ogr:FeatureCollection`. El atributo `xmlns` es lo que realmente indica la definición de los diferentes espacios. En este fichero GML existen tres espacios `xsi`, `ogr` y el mencionado `gml`.

El espacio `xsi` es el que se usa en la especificación de esquemas XML (`xsd`), según la recomendación del consorcio para estándares web W3C. El atributo `schemaLocation`

Listado 3.1: Fichero en formato GML

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<ogr:FeatureCollection
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://ogr.maptools.org/ soil_colour.xsd"
  xmlns:ogr="http://ogr.maptools.org/"
  xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml">
  <gml:boundedBy>
    <gml:Box>
      <gml:coord>
        <gml:X>691327.39</gml:X>
        <gml:Y>4269570.08</gml:Y>
      </gml:coord>
      <gml:coord>
        <gml:X>693768.3</gml:X>
        <gml:Y>4271467.03</gml:Y>
      </gml:coord>
    </gml:Box>
  </gml:boundedBy>
  <gml:featureMember>
    <ogr:soil_colour.gml fid="soil_colour.gml.0">
      <ogr:geometryProperty>
        <gml:Point>
          <gml:coordinates>693768.3,4271467.03</gml:coordinates>
        </gml:Point>
      </ogr:geometryProperty>
      <ogr:LAB>6490</ogr:LAB>
      <ogr:CRS>ED50</ogr:CRS>
      <ogr:Luminance>59.69000</ogr:Luminance>
      <ogr:x>0.37050</ogr:x>
      <ogr:y>0.38410</ogr:y>
    </ogr:soil_colour.gml>
  </gml:featureMember>
  <gml:featureMember>
    <ogr:soil_colour.gml fid="soil_colour.gml.0">
      <ogr:geometryProperty>
        <gml:Point>
          <gml:coordinates>691327.39,4269570.08</gml:coordinates>
        </gml:Point>
      </ogr:geometryProperty>
      <ogr:LAB>6509</ogr:LAB>
      <ogr:CRS>ED50</ogr:CRS>
      <ogr:Luminance>37.31000</ogr:Luminance>
      <ogr:x>0.38540</ogr:x>
      <ogr:y>0.39060</ogr:y>
    </ogr:soil_colour.gml>
  </gml:featureMember>
</ogr:FeatureCollection>

```

del espacio de nombres **xsi** se utiliza para introducir un esquema que usará el espacio de nombres de <http://ogr.maptools.org/> y que se almacenará en el fichero **soil_colour.xsd** en el disco duro local junto al archivo **soil_colour.gml**.

Los esquemas XML son en realidad sublenguajes XML que permiten definir los datos de manera más precisa que con el lenguaje XML genérico. El formato GML se basa en un conjunto de esquemas XML (denominados *XML schemas* o *XML Schema Definition Languages* XSDL en la terminología habitual). Un conjunto de datos GML está formado habitualmente por dos ficheros, el propio fichero GML y un fichero de esquema asociado XSD. Los esquemas (XSD) se almacenan en ficheros con extensión **xsd** y tienen el mismo nombre que los ficheros GML asociados.

En el caso particular de los datos del Listado 3.1, se accede indirectamente al esquema <http://schemas.opengis.net/gml/2.1.2/feature.xsd>, que contiene las definiciones de elementos como `<gml:boundedBy>`, `<gml:Box>`, `<gml:coord>`, `<gml:X>` o `<gml:Y>`. Los programas de procesamiento GML pueden acceder a los esquemas a través de direcciones web o bien a través de ficheros locales. En concreto, el fichero local **soil_colour.xsd** mencionado previamente contiene el enlace a **feature.xsd**, proporcionando acceso a sus elementos.

El formato GML también contempla otro tipo de complemento denominado perfil. Los perfiles son restricciones lógicas al formato GML y se pueden almacenar en el fichero que contiene los datos GML o bien en un esquema XML. Los conceptos de esquema y perfil son distintos. La definición del perfil forma parte de los espacios de nombres en los que se sustenta un conjunto de datos, mientras que los esquemas son contenedores que almacenan especificaciones que pueden estar basados en un perfil particular o en todo el conjunto GML.

En particular, el elemento `<gml:Point>` del Listado 3.1, perteneciente al espacio **gml**, está definido en un perfil llamado *GML point profile*. Este perfil GML define un conjunto de elementos (entre los cuales está `gml:Point`), junto con elementos dependientes y atributos del espacio GML (Lake and Reed, 2005).

El elemento `<gml:Point>` también está definido en otro perfil denominado *GML*

Simple Features profile (GML-SF) que permite añadir a los elementos espaciales propiedades no disponibles en el perfil de puntos. Estos dos perfiles se adaptan especialmente a los datos típicos del muestreo de suelos.

En la propia especificación del perfil GML-SF aparece un párrafo con especial relevancia para esta tesis (Vretanos, 2005):

This profile is concerned with the 'basic' schemas for use with relatively simple systems, such as those that use features that are represented (at least conceptually) by a single database table. That is, they have a flat list of feature properties and the properties may be of simple scalar types like Number, String, and Boolean and may include one or more spatial properties.

Este marco en el cual el conjunto de datos, coordenadas espaciales y atributos, se puede representar rigurosamente con una única tabla encaja perfectamente con las características de los datos que se reseñaron en la introducción de este capítulo.

El Listado 3.1 contiene dos puntos de muestreo, localizados por las coordenadas que se observan en los elementos `<gml:coordinates>`, junto con las coordenadas Yxy que se midieron en laboratorio. Los datos se generaron a partir de dos ficheros independientes. Uno de estos ficheros contenía la información espacial (coordenadas UTM y sistema de referencia), mientras que el segundo fichero contenía la información colorimétrica. El programa desarrollado en el curso de esta tesis (CS-100A) toma los dos ficheros, los combina mediante un enlace relacional y presenta en la salida la información completa, posición y color, en un único fichero GML, cumpliendo de esta manera con los requerimientos OGC en cuanto a formato de datos de intercambio de información geográfica. El Capítulo 4 y el Apéndice A contienen detalles técnicos de funcionamiento e implementación.

El formato GML no está implantado de manera generalizada todavía, pero ya hay iniciativas para convertirlo en el estándar. La aparición de un gran número de perfiles cuyo objetivo es facilitar el uso del formato va en esa dirección. A nivel más práctico también hay autores o instituciones que están intentando potenciarlo (Sen and Duffy, 2005; Lake, 2005).

En lo referente a la implantación del formato GML en la Ciencia del Suelo cabe destacar un proyecto llamado SoTerML (*Soil and Terrain Markup Language*). El proyecto comenzó a desarrollarse en 2009 en el *Centre for Geospatial Science* de la Universidad de Nottingham y actualmente el desarrollo se lleva a cabo en una plataforma llamada e-SOTER en el *National Soil resources Institute* de la Universidad de Cranfield.

Formato Shapefile

El formato *Shapefile* se ha convertido en un estándar para la representación, distribución e intercambio de datos geográficos, aunque no está considerado como un estándar OGC. Aún así resulta conveniente incluirlo como formato de salida en cualquier aplicación que genere datos geográficos.

Este formato fue introducido por ESRI en 1995 y su especificación es pública (ESRI, 1998). Se trata de un formato relativamente sencillo, formado por una colección de varios ficheros y que no almacena topología. Los datos se almacenan en formato binario.

Tabla 3.7: Ficheros del formato Shapefile

Fichero	Sufijo	Contenido
Principal	SHP	Geometría de los elementos gráficos. Existen tres geometrías principales: punto, línea y polígono con variantes. Este fichero es obligatorio.
Índice	SHX	Índice que relaciona cada elemento geométrico con su correspondiente registro de la tabla de atributos. Este fichero es obligatorio.
Atributos	DBF	Tabla de atributos. Este fichero es obligatorio.
Proyección	PRJ	Información sobre el sistema de referencia espacial de los datos. Este fichero es opcional.
Índice	SBN, SBX	Índices espaciales para acelerar la búsqueda de elementos en los ficheros. El formato de estos ficheros no está documentado oficialmente. Estos ficheros son opcionales.

Un *Shapefile* está formado como mínimo por tres ficheros (Tabla 3.7) con extensiones o sufijos SHP, DBF y SHX. El fichero SHP contiene la geometría de los objetos espaciales, el fichero DBF contiene los atributos y el fichero SHX contiene un índice que relaciona

cada objeto geométrico con su correspondiente registro en la tabla de atributos.

Los tipos numéricos utilizados son:

- Enteros con signo de 32 bits y 64 bits
- Reales de doble precisión con signo de 64 bits

El fichero principal o de geometría (SHP) está estructurado en dos partes: cabecera y datos. La cabecera tiene un tamaño de 100 bytes y contiene la siguiente información:

- Tamaño de fichero
- Versión
- Tipo de elemento: punto, línea, polígono, o alguna de sus variantes
- Extensión de los datos. Se almacenan los valores de X-min, Y-min, X-max, Y-max, Z-min, Z-max, M-min, M-max

Los números (enteros y reales) de la cabecera combinan los esquemas de ordenación *little endian* y *big endian*. En cambio todos los números de la zona de datos están almacenados con orden *big endian*. El uso del esquema de ordenación adecuado es fundamental para la comunicación y la interpretación de datos (Cohen, 1981).

La zona de datos se estructura en registros, los cuales también están divididos en cabecera y datos. La cabecera de los registros tiene dos campos de 4 bytes que almacenan el número de registro y el tamaño (en bytes) de los datos almacenados en el registro. En el caso de un mapa de puntos se almacenarán dos coordenadas como números reales dobles que ocupan 8 bytes cada uno, por tanto, en un mapa de puntos todos los registros de datos tienen un tamaño o longitud de 24 bytes.

El fichero índice (SHX) también está compuesto por una cabecera y por un conjunto de datos estructurados en registros. La cabecera tiene un tamaño de 100 bytes y su organización es idéntica a la cabecera del fichero principal. Los registros del índice son de longitud fija de 8 bytes y contienen 2 campos de 4 bytes para especificar la posición (*offset*) y el tamaño del registro correspondiente en el fichero principal .

La tabla de atributos (DBF) se almacena en un conocido formato denominado dBASE. El formato es el estándar y la única restricción del fichero de atributos es que debe contener el mismo número de registros y además en el mismo orden que el fichero principal.

Esta restricción permite el acceso a los registros por la posición que ocupan en el fichero, sin necesidad de índices adicionales.

Existe un conjunto de ficheros que pueden acompañar opcionalmente a los tres ficheros obligatorios (Tabla 3.7). La información sobre el sistema de referencia se almacena en un fichero de proyección PRJ que contiene la información en un formato de texto denominado WKT (*well known text*) que se ha convertido en un estándar. El sistema de referencia EPSG:23030 se representa con la siguiente cadena de texto:

```
PROJCS["ED50 / UTM zone 30N",  
  GEOGCS["ED50",  
    DATUM["D_European_1950",  
      SPHEROID["International_1924", 6378388, 297]],  
    PRIMEM["Greenwich", 0],  
    UNIT["Degree", 0.017453292519943295]],  
  PROJECTION["Transverse_Mercator"],  
  PARAMETER["latitude_of_origin", 0],  
  PARAMETER["central_meridian", -3],  
  PARAMETER["scale_factor", 0.9996],  
  PARAMETER["false_easting", 500000],  
  PARAMETER["false_northing", 0],  
  UNIT["Meter", 1]]
```

3.5 Metadatos

La situación actual de las tecnologías de la información geográfica, dominadas por colecciones de recursos en línea y que potencialmente se pueden integrar con datos procedentes de distintas fuentes exige una documentación detallada de todas las características de los datos: los metadatos. La existencia de metadatos permite la correcta interoperabilidad, la cual es un objetivo de los estándares actuales comentados previamente (EU, 2007).

En el caso particular de esta tesis, la obtención de la información del color del suelo implica la integración de distintas tecnologías. Sin embargo, los datos de color por sí

mismos tienen una utilidad limitada a tareas de consulta o inventario de muestras espacialmente distribuidas. Es la combinación con otros conjuntos de datos, espaciales o no, la que permite mejorar el estado del conocimiento.

Los requerimientos para el tratamiento eficiente de datos en este tipo de operaciones no suelen tratarse en la bibliografía a pesar de su importancia (Brimicombe, 2009). En este sentido la adopción de estándares oficiales y la creación de conjuntos de metadatos proporciona una base adecuada para afrontar el problema, aunque no se puede decir que la cuestión esté completamente resuelta debido a la falta de consenso sobre el tema (Nogueras-Iso et al., 2005; Green and Bossomaier, 2002). La Tabla 3.8 contiene una división con los metadatos necesarios para describir un conjunto de datos espaciales con información del color del suelo (no se incluyen elementos para datos representados con imágenes raster).

Tabla 3.8: Grupos de metadatos

Grupo	Campos de información
Identificación	Autor, título, fecha, frecuencia de actualización, extensión espacial, palabras clave, restricciones de uso y acceso, datos de contacto
Calidad	Exactitud geométrica y temática, completitud, escala
Organización de datos	Entorno de desarrollo de datos, tipo de objeto espacial, referencia geográfica para datos tabulares, tipos de objeto específicos, firmas comerciales
Sistema de referencia	Datum horizontal, datum vertical, proyección, unidades
Entidades	Descripción genérica y detallada
Distribución	Distribuidor, fecha, dirección postal, teléfono, dirección electrónica, formato de datos, instrucciones para pedidos, disponibilidad en línea
Referencia de metadatos	Fecha, datos de contacto, nombre del estándar de metadatos, versión

La confección de un conjunto de metadatos completo puede ser una tarea muy laboriosa (Albrecht, 2007) y los estándares plantean esquemas que en ocasiones pueden llegar a ser inasumibles por ciertos usuarios. Un ejemplo claro es el conjunto de metadatos de la norma ISO 19115 que contiene más de 350 elementos (Nogueras-Iso et al., 2005). En este

sentido hay iniciativas que tienden a reducir el volumen de metadatos necesarios para la descripción correcta de los datos espaciales. La iniciativa *Dublin Core* (DCMI), que forma la base de la norma ISO 15836:2009 *Information and documentation. The Dublin Core metadata element set*, se desarrolló para la descripción de bibliotecas digitales genéricas, donde se incluyen recursos tan diversos como videos, imágenes, páginas web o incluso ejemplares físicos. La DCMI propone dos niveles de metadatos: simple y cualificado. El nivel simple consiste en un conjunto de 15 metadatos que en muchos casos puede ser suficiente, incluso para conjuntos de datos espaciales complejos, aunque no resulta fácil describir algunos de los elementos de la Tabla 3.8.

En España se ha desarrollado el Núcleo Español de Metadatos (NEM) que se define como “un subconjunto de elementos de metadatos de ISO 19115:2003, considerado como el mínimo recomendable por su relevancia y significado, constituyendo por lo tanto un núcleo, un conjunto de metadatos “mínimo” esencial y cuya utilización prioritaria se recomienda a la hora de crear metadatos” (Subgrupo de Trabajo de Metadatos, 2010). El NEM contiene más de 400 elementos.

En el caso de la cartografía de suelos existe una iniciativa para crear una base de datos europea georreferenciada, entre cuyas tareas está la de crear una metabase de datos (*metadatabase*). El manual de procedimientos la define como “Una base de datos (electrónica o en papel) que contenga toda la información sobre los textos, memorias, leyendas, mapas, y demás material que se utilice al objeto de construir una base de datos concreta. En otras palabras, se trata de una base de datos que informa sobre la elaboración de otra base de datos” (Finke et al., 2001).

La definición es muy vaga y probablemente las futuras versiones del manual incluirán definiciones y marcos más detallados a medida que los usuarios aporten información. El manual es poco preciso y la única referencia a ejemplos concretos de metadatos es la siguiente “como ejemplos de metadatos habría que contemplar: proyección de los mapas disponibles, escala de los mismos, referencia a la leyenda utilizada, densidad espacial de las observaciones sobre los que se confeccionó la cartografía, referencias a las bases de datos digitales construidas con mapas y datos puntuales, año de publicación, etc.”

Capítulo 4

Desarrollo de un procedimiento de laboratorio

4.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan las aportaciones de esta tesis. Estas aportaciones se materializan en una propuesta metodológica que permite cumplir el objetivo planteado en el título de la tesis: construir bases de datos espaciales del color del suelo de manera eficiente. La metodología incluye la división del flujo de trabajo en fases, la equipación de laboratorio y los programas de aplicación necesarios. La lectura de este capítulo requiere consultas a otras partes de la tesis. Los capítulos previos contienen el marco teórico y práctico que de alguna manera determina la secuencia de operaciones propuesta. Los detalles de programación, implementación y aplicación se encuentran en los apéndices.

Antes de entrar en materia es conveniente recordar algunas cuestiones sobre la determinación clásica del color del suelo. El procedimiento clásico es una operación sencilla desde el punto de vista conceptual. El usuario toma una fracción de la muestra de suelo, la compara visualmente con una colección de fichas coloreadas y asigna la notación de color de la ficha que visualmente más se asemeja a la muestra (Figura 4.1). Sin embargo esta sencillez en la operación presenta serias dificultades prácticas. Las dificultades se deben fundamentalmente a dos aspectos reseñados en los capítulos anteriores.

En primer lugar, el sensor utilizado para codificar el color es el ojo humano. El ojo es sólo una parte del sistema de visión humano que trabaja en combinación con una serie de sistemas y circuitos neuronales cuyo funcionamiento todavía no se conoce de manera precisa (Capítulo 1). Esta metodología, en la cual se utiliza un instrumento de medida

“subjetivo” supone una anomalía en el mundo de la Física de manera que se puede afirmar que las mediciones dependen del observador aunque el resto de factores del experimento permanezcan perfectamente controlados (Rigg, 1997).

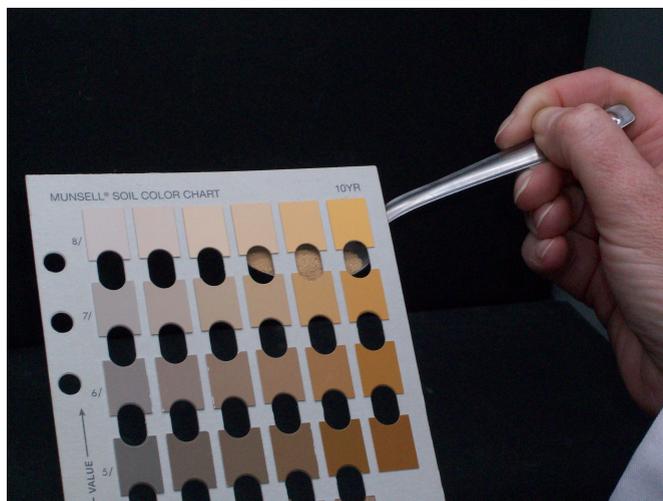


Figura 4.1: Determinación del color del suelo con tablas Munsell

En segundo lugar el procedimiento de determinación de color clásico en la Ciencia del Suelo se basa en el uso de cartas de color. El uso de estas cartas aporta un componente adicional de indeterminación para el tratamiento numérico del color. Por una parte las cartas de color sufren deterioros que pueden afectar sensiblemente a la asignación del color de una muestra de suelo (Figura 4.2). Por otra parte, las cartas de color contienen un número limitado de fichas coloreadas, lo cual obliga a asignar colores que no coinciden exactamente con la muestra, o en su defecto a interpolar visualmente y numéricamente valores intermedios. Además, las tablas de color del suelo, entre las cuales las tablas Munsell son las más ampliamente utilizadas, componen un espacio de ordenación de color. En el Capítulo 1 se describieron varios espacios de ordenación de color y se comentó que una de sus principales limitaciones se debía a la dificultad de representar numéricamente el color, lo cual limita las posibilidades de tratamiento automático del color del suelo. Esto

es debido a que los espacios de ordenación de color han sido diseñados para ser utilizados en comparaciones visuales, donde cumplen perfectamente su función y también al uso de notaciones alfanuméricas para especificar colores. Las diferencias con los espacios de color CIE descritos en el Capítulo 2 son evidentes.

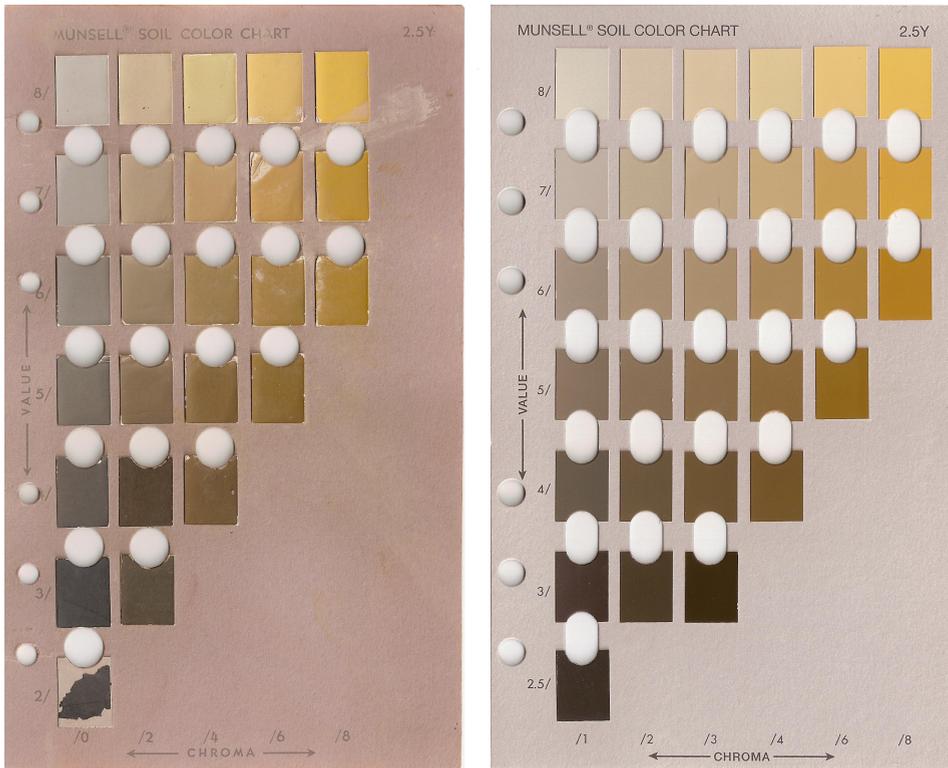


Figura 4.2: Deterioro de las tablas de color

Los cambios de la iluminación ambiental suponen una última limitación del uso de tablas, aunque en este caso se pueden realizar observaciones de laboratorio con iluminación perfectamente controlada que eliminaría este factor de incertidumbre al poder replicar las condiciones de observación. La asignación de colores en exteriores, en cambio, puede complicar el proceso de asignación del color debido a las variaciones en la composición espectral que sufre la luz natural a lo largo del día. En este caso se deberían respetar las recomendaciones clásicas y observar únicamente en las horas centrales del día (Soil

Survey Division Staff, 1993; Sánchez-Marañón et al., 2011).

La combinación de las circunstancias que se acaban de describir han constituido una motivación fundamental para llevar a cabo esta tesis. Por una parte el uso de sistemas de ordenación del color, en particular las tablas Munsell de suelos, supone una limitación tanto en la precisión de la determinación del color como en el almacenamiento en soportes digitales y el tratamiento automático. Esto nos ha llevado a realizar varios estudios que ayudan a comprender de manera más rigurosa el proceso de asignación de color y por tanto proponer un procedimiento que minimice las limitaciones del mismo.

En este sentido se presentan primero los resultados de un análisis de coincidencia de atributos (*attribute agreement analysis* o AAA). Este estudio permite interpretar de manera clara las limitaciones del procedimiento de asignación de notaciones de color mediante tablas Munsell. En las secciones restantes se describen la aproximación empleada para convertir notaciones alfanuméricas en coordenadas colorimétricas CIE, así como el resto de elementos necesarios para incluir la información colorimétrica en una base de datos espacial.

4.2 Limitaciones del uso de tablas de color del suelo

En esta sección se describen las dificultades a las que debe enfrentarse el usuario interesado en la medición precisa del color del suelo. Aunque esta operación se realiza rutinariamente en Edafología y otras ramas de la Ciencia del Suelo, son pocos los estudios rigurosos acerca de la exactitud del método. En el Capítulo 1 se reseñaban los primeros intentos de determinación del color del suelo a principios del siglo XX. Estos primeros intentos de determinación sistemática del color se centraron en la tecnología necesaria para la propia comunicación de la información colorimétrica y no prestaban atención a la exactitud de las mediciones. No obstante, la documentación de aquellos primeros trabajos destacaba el uso de la tecnología más avanzada de la época para realizar las mediciones de color (Simonson, 1993). Entre las tecnologías utilizadas se encuentran los discos de Maxwell y los atlas de color que finalmente se establecieron como opción definitiva.

A medida que la disciplina maduró se comenzó a plantear la cuestión de la exactitud de las mediciones. Así por ejemplo, Simonson (1993) en sus trabajos seminales realiza una analogía entre el tratamiento de errores en las observaciones geodésicas y los errores de observación en las tablas de color Munsell. En esos trabajos se introduce el concepto de esfera de error a partir de unos supuestos errores de observación en las dimensiones tono, valor y croma.

El enfoque basado en la esfera de error no se implantó de manera numérica y los usuarios de las tablas Munsell, aún siendo conscientes de las limitaciones de dichos dispositivos, no han propuesto un método sistemático para cuantificar el error de las notaciones Munsell. En trabajos más recientes tampoco se cuantifica la incertidumbre de las observaciones a las tablas Munsell.

A continuación se tratan dos aspectos fundamentales que pensamos deben ser tenidos en cuenta para realizar medidas del color del suelo precisas. Estos dos aspectos son la preparación de la muestra y la rutina o metodología de medición. En el primer caso parece conveniente definir una preparación estándar para poder realizar experimentos reproducibles. En el segundo caso la rutina de observación y la instrumentación utilizadas permitirán reducir la incertidumbre de las observaciones hasta el límite de la tecnología disponible. Estos dos aspectos prácticos del proceso de medida sirven de base para diseñar el procedimiento de medición y almacenamiento de la información colorimétrica.

Preparación de muestras y rutina de observación

La primera cuestión a tener en cuenta es la propia preparación de la muestra y en particular el tamaño de partícula de la preparación. Los métodos de laboratorio oficiales no establecen un tamaño de grano específico para las determinaciones del color de las muestras, únicamente contiene información que se refiere al análisis físico de suelos en un sentido más general.

El SSM (Soil Survey Division Staff, 1993), por ejemplo, sólo hace referencia a dos tipos de procesamiento de muestras que denomina muestras trituradas (*crushed*) y agregados o muestras sin procesar. La norma oficial UNE 77303:1997 (AENOR, 1997), o

su equivalente internacional ISO 11464:1994, describe la preparación con mucho mayor detalle. Sin embargo, esta norma ya no está en vigor y la referencia más actualizada en cuanto a preparación de muestras de suelos es el *Soil Survey Laboratory Methods Manual* (Burt, 2004).

Hay una distinción entre la fracción orgánica y la fracción mineral. En ambos casos la norma especifica que se debe eliminar el material vivo como raíces o musgos con tamaños superiores a 2 cm. El material restante se debe secar en horno a 80 °C o al aire hasta conseguir peso constante para su posterior almacenamiento. La muestra seca se tritura y se procesa mediante tamizado. El tamiz de referencia es el de 2 mm que separa los elementos gruesos y finos. Los análisis de suelos se realizan con la fracción de elementos finos, los cuales no deben ser machacados de nuevo, excepto en el caso de análisis de contenido de carbonatos, nitrógeno total o carbono orgánico total.

En este trabajo se realizó un ensayo específico para observar las variaciones de las mediciones de color en función del tamaño de partícula de la preparación. El objeto de este ensayo es determinar si los elementos cromógenos se pierden según la preparación de la muestra, lo cual influiría en las mediciones y en los posteriores análisis colorimétricos.

Se seleccionaron varias muestras de suelos rojos, amarillos, blancos, negros y marrones, representativos de los suelos de la zona Mediterránea. Asimismo se procesaron distintas fracciones de cada muestra con tamaños de partícula desde 0.05 mm hasta 4 mm utilizando tamices adecuados a cada preparación. Los datos de tres de estas muestras se pueden observar en la Tabla 4.1 y en la Figura 4.3.

Los resultados son bastante claros y se pueden resumir en dos aspectos de indudable interés práctico:

- La cromaticidad de las muestras no varía con el tamaño de grano.
- La luminancia de las muestras varía de manera inversamente proporcional al tamaño de grano de la preparación.

El primer punto es fundamental para la práctica de la Colorimetría en el estudio del color del suelo, ya que indica que la preparación de muestras mediante tamizado no modifica

Tabla 4.1: Medidas de color con diferente tamaño de partícula

Tamiz	M15			M16			M17		
	x	y	β	x	y	β	x	y	β
0.05	0.456	0.448	0.274	0.490	0.439	0.298	0.439	0.449	0.230
0.10	0.456	0.448	0.254	0.488	0.436	0.249	0.440	0.448	0.218
0.16	0.454	0.445	0.237	0.487	0.436	0.246	0.439	0.451	0.204
0.20	0.453	0.450	0.230	0.485	0.437	0.230	0.441	0.446	0.198
0.25	0.453	0.449	0.223	0.486	0.437	0.227	0.442	0.449	0.198
0.40	0.452	0.447	0.213	0.484	0.437	0.212	0.439	0.451	0.198
0.50	0.452	0.450	0.216	0.484	0.440	0.210	0.442	0.451	0.196
1.00	0.451	0.449	0.212	0.485	0.438	0.214	0.443	0.448	0.194
2.00	0.450	0.449	0.208	0.485	0.439	0.197	0.442	0.448	0.191
4.00	0.452	0.446	0.202	0.484	0.439	0.187	0.445	0.449	0.177

Nota: β es el factor de luminancia

la proporción de elementos cromágenos. En este sentido, el usuario es libre de elegir el tamaño de partícula más adecuado para sus analíticas.

El segundo punto está en estrecha relación con el concepto de superficie específica. La superficie específica es el área total de un material por unidad de volumen o masa y su valor aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula. Por tanto, los tamaños de partícula más pequeños producen un aumento de la superficie reflectante, con lo cual el valor de la reflectancia también aumenta. El resultado es que la luminancia, en el sentido en que representa la intensidad de la señal luminosa, aumenta de manera no lineal al aumentar la superficie específica (Figura 4.3).

Los dos puntos anteriores se desprenden directamente de las mediciones de color. La experiencia del laboratorio permitiría añadir un tercer punto, difícilmente cuantificable, relacionado con la comodidad de manejo de las muestras. En este sentido, el tamaño que resultó más cómodo fue el de 2 mm. Los tamaños mayores no permitían hacer mezclas homogéneas debido a la existencia de granos muy finos junto con granos muy gruesos. Esta mezcla hacía que la matriz de la muestra fuera muy diferente en la placa de preparación al repetir las medidas. Asimismo, los tamaños de tamiz menores eliminaban partículas que estaban presentes en la matriz del suelo original.

Aunque los datos muestran que la cromaticidad no varía, incluso en los tamaños de

grano muy fino, el usuario no puede evitar un cierto efecto psicológico y preguntarse si las mediciones son adecuadas al observar la ausencia de partículas cromógenas claramente visibles en preparaciones con tamaños de grano mayor. Aunque este comentario es completamente subjetivo, complementa a los resultados numéricos en el sentido de elegir como tamaño de grano más adecuado el de 2 mm. Este tamaño coincide además con la recomendación para otros tipos de preparaciones. La Figura 4.3 encaja bien con este razonamiento puesto que la zona en torno al tamaño de 2 mm es la que presenta las pendientes más suaves y por tanto las que producen las mínimas variaciones de luminancia.

La rutina de medición comprende todas las operaciones de manipulación necesarias para obtener la información colorimétrica de la muestra. En primer lugar una fracción de la muestra (o la muestra completa en caso necesario) se extrae de su recipiente y se prepara en una placa Petri (Figura 4.4). A continuación la placa se deposita en un punto concreto de la cabina de color para realizar las medidas sobre ella (Figuras 4.6 y 4.7). Finalmente se realiza la medición de color y el material se devuelve al contenedor inicial para su almacenamiento.

Las muestras analizadas en el Laboratorio de Suelos tienen características específicas que los diferencian de los especímenes tratados en otras aplicaciones colorimétricas. Estas características deben ser tenidas en cuenta tanto para decidir la rutina de medición como para diseñar un entorno de trabajo adecuado. Algunas de estas características son obvias, pero no por ello se deben ignorar. Las características más significativas de las muestras de suelo típicas son:

- Las muestras de suelo tienen textura. La textura es la organización o estructura de un objeto o sustancia en lo referente al tamaño, forma u ordenación de sus componentes elementales.
- Las muestras de suelo son granulares. La granulometría determina los tamaños de las distintas partículas de una muestra en la cual no existe cohesión entre esas partículas.
- Las muestras de suelo pueden contener partículas de grano muy fino.

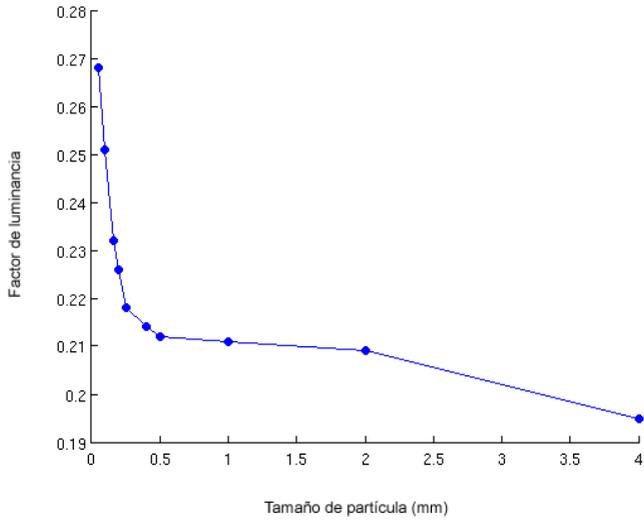


Figura 4.3: Efecto del tamaño de partícula en la luminancia



Figura 4.4: Muestra preparada para las medidas de color

La textura es un atributo geométrico y no colorimétrico que afecta la distribución espacial de la luz reflejada por la muestra analizada (Hunter and Harold, 1987). El contenido de textura puede afectar a la medición de la luminancia y en ocasiones a la medición del color si existe un componente especular importante. Las aplicaciones colorimétricas de la industria textil tratan habitualmente muestras con textura, pero mientras las muestras textiles presentan texturas regulares, las muestras de suelo presentan texturas irregulares dependiendo de la granulometría.

Las interacciones entre luz y materia que dan como resultado el color percibido están representadas en la Figura 4.5. En ella se observa la energía incidente, la energía reflejada directamente por la superficie de la muestra (componente especular), la energía absorbida y la energía reflejada tras la interacción con la muestra por mecanismos de dispersión. La sensación percibida como “color de la muestra” está originada por la energía que interactúa con el objeto. La componente especular no proporciona información colorimétrica del objeto, sino de la luz incidente. En un caso extremo, si se produce un reflejo el color observado será el color de la luz incidente, el cual puede llegar a enmascarar completamente el color de la muestra.

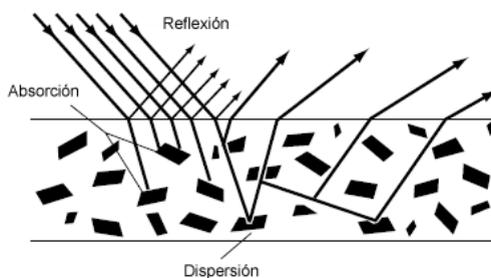


Figura 4.5: Componentes de la interacción entre luz y materia

Las recomendaciones propuestas por la CIE para experimentos de medición de color comprenden hasta 10 combinaciones geométricas para objetos opacos. La geometría adoptada en este trabajo, tal y como se indicó en el Capítulo 2, es la geometría $45^{\circ}/0^{\circ}$ la cual excluye la componente especular pero captura todo el efecto de la textura (CIE, 2004). El

efecto de la combinación geometría/textura en el color observado ha sido estudiado previamente y en ciertos casos puede llegar a ser importante.

Billmeyer y Marcus (1969) detectaron disminuciones claras en la saturación del color al realizar mediciones con instrumentos provistos de esfera integradora, los cuales permiten eliminar o incluir la componente especular. Las diferencias se detectaron al comparar las medidas con componente especular excluida con las mediciones con geometría $45^\circ/0^\circ$. Estas diferencias eran claramente superiores a las diferencias mínimas detectables (superiores a 10 unidades CIELAB) en muestras de claridad media con cromas elevados, siendo menores en muestras más claras y con cromas bajos. Xin et al. (2005) detectaron variaciones de hasta 5 unidades CIELAB en la dimensión claridad debido a la textura de muestras textiles.

Las partículas de grano fino presentan un problema de tipo práctico en la medición del color. Una acumulación de partículas finas en la zona central del portamuestras produciría un valor de luminancia demasiado alto. Esto se debe evitar en el laboratorio haciendo varias mediciones, realizando una “nueva” preparación mediante la agitación de la propia muestra entre las distintas mediciones de color. Esta práctica hace que el aspecto de la muestra cambie debido a la distinta distribución de las partículas sobre el portamuestras, y sea posible observar de alguna manera la variabilidad existente en los distintos componentes de la muestra, es decir, sería posible cuantificar el efecto de la textura en las mediciones de color.

Un último efecto de las partículas de grano fino es la formación de nubes de polvo. Los experimentos de Colorimetría se deben realizar en entornos aislados de fuentes de suciedad y polvo. El espacio destinado para estos experimentos en el Laboratorio de Suelos cumple estas condiciones aunque hay que tener en cuenta que las propias muestras están compuestas de material granular con tamaños de partícula por debajo de 2 mm. La incorrecta manipulación y preparación de las muestras pueden producir la aparición de polvo dentro del laboratorio, que se adhiere fácilmente a todo tipo de objetos presente en el laboratorio, incluyendo el colorímetro y las paredes y suelo de la cabina de color.

Esto obliga a ser especialmente cuidadosos con este tipo de materiales. Como parte

del protocolo de laboratorio se debe limpiar la cabina para eliminar los restos de polvo que producen un efecto sobre el fondo donde se depositan las muestras para su medición. Este efecto da como resultado un fondo más claro debido a la presencia de las partículas de polvo. Asimismo, la preparación de muestras se realizará a cierta distancia de la cabina, sin sacudir los contenedores donde se conservan las muestras.

Estas razones nos han llevado a plantear una rutina de medición de color que consta de los siguientes pasos:

1. Rellenar la placa Petri con la muestra de suelo
2. Mover la placa hasta obtener una superficie “plana” y “homogénea”
3. Depositar la placa en la cabina
4. Medir el color
5. Sacar la placa de la cabina
6. Mezclar el material contenido en la placa Petri
7. Repetir los pasos 2 y 3
8. Medir el color
9. Repetir los pasos 5, 6 y 7
10. Medir el color

La rutina propuesta incluye tres mediciones de color. La dispersión en las medidas puede ser atribuida a la textura de la propia muestra, aunque la experiencia nos indica que las diferencias entre mediciones son muy pequeñas (usualmente menores del 1% en Luminancia e inferiores a 0.01 unidades en los ejes del diagrama de cromaticidad xy). Los valores que se usarán en cálculos posteriores serán los promedios de las tres mediciones de las coordenadas Yxy Hunterlab (2008).

Análisis de coincidencia de atributos

La segunda cuestión vinculada a la incertidumbre de las medidas del color del suelo está relacionada con la propia metodología utilizada para la medición. La combinación de un método visual con un dispositivo, la tabla Munsell, que sufre deterioros con el uso y el paso del tiempo hace que la cuantificación de dicha incertidumbre sea difícil de determinar. La ausencia de estudios rigurosos sobre este tema es significativa y parece apoyar esta idea.

A continuación se presentan los resultados de un estudio de coincidencia de atributos o *attribute agreement analysis* (AAA) realizado con datos de observación del color con tablas Munsell. Los resultados permiten conocer con mayor detalle el proceso de asignación de colores mediante tablas de color.

El AAA se basa en tres niveles de calidad. El primer nivel de análisis es aquel que permite determinar si un evaluador entrenado es capaz de asignar siempre la misma notación Munsell ante la misma muestra. El segundo nivel estudia la coherencia entre evaluadores, es decir, si los evaluadores asignan la misma notación ante la misma muestra. En estos dos niveles no se tiene en cuenta si las asignaciones de los evaluadores son correctas o no. Es el tercer nivel el que examina precisamente si los evaluadores asignan la notación real a las muestras.

El estudio se llevó a cabo con 449 muestras de suelo. Las muestras proceden de la colección del Laboratorio de Suelos de la UPV y de dos levantamientos recientes. Los levantamientos se llevaron a cabo en el municipio de Sax (Alicante) y en el municipio de Valencia.

Las 449 muestras fueron observadas por dos procedimientos que permiten obtener los dos conjuntos de datos necesarios para llevar a cabo el AAA. En primer lugar, las muestras fueron observadas en dos ocasiones distintas y separadas en el tiempo por cuatro observadores entrenados. Las observaciones se realizaron mediante el enfoque clásico basado en el uso de tablas Munsell, intentando replicar de la manera más fiel las condiciones geométricas del equipo de laboratorio descritas en la Sección 4.3. Las sesiones de laboratorio tenían una duración máxima de media hora para evitar la fatiga visual de los

observadores.

En segundo lugar, se realizó una segunda observación mediante colorímetro de manera independiente a la observación basada en tablas Munsell. El único nexo entre las dos observaciones fue la cabina de color utilizada tanto para las observaciones visuales como para las observaciones con colorímetro. El objetivo de esta segunda observación con colorímetro es la obtención de “patrones” en los términos que se describen a continuación.

El análisis de coincidencia de atributos se realiza comparando estadísticamente los datos observados por los evaluadores o *apparisers* (nuestros cuatro observadores) con un conjunto de datos compuesto por patrones cuyos valores se suponen verdaderos. Las notaciones Munsell asignadas por los cuatro observadores se deben contrastar por tanto con “valores verdaderos”. Es fácil adivinar que la obtención de patrones o valores verdaderos de muestras de suelo es un tarea complicada. En realidad esta tarea es materialmente imposible estrictamente hablando, es decir, no hay manera de obtener la notación Munsell verdadera de las muestras sin utilizar algún procedimiento observacional, que a su vez estará sujeto a algún tipo de error de observación.

La solución que hemos adoptado en este trabajo ha sido la de obtener un conjunto de patrones mediante un procedimiento que no requiere intervención humana. El procedimiento consiste en obtener las coordenadas Y_{xy} de las muestras de suelo con el colorímetro tricromático y convertirlas a notaciones Munsell. Esta transformación presenta sus propias complicaciones, pero es un proceso de clasificación automática, que se puede llevar a cabo sin intervención del observador, más allá de pulsar las teclas del instrumento. El proceso completo está descrito con detalle en la Sección 4.4.

El proceso de clasificación asignó un total de 54 notaciones o etiquetas Munsell únicas al conjunto de muestras, es decir, las 449 muestras totales se dividieron en 54 grupos identificados cada uno de ellos por una etiqueta en particular. La etiqueta asignada por el proceso de clasificación automático se asimila al concepto de patrón (valor verdadero) del análisis de atributos ya que es la mejor notación disponible.

Algunos de los grupos de patrones definidos por el colorímetro estaban compuestos por un número muy reducido de muestras y debido a su poco peso estadístico se elimi-

naron de los análisis. Los subconjuntos analizados finalmente fueron 7 de los 54 iniciales, y están agrupados por tono y por notación Munsell completa en la Tabla 4.2. Esta tabla permite hacerse una primera idea de las limitaciones del uso de tablas de color. La última columna contiene el número de aciertos de los evaluadores que en el mejor de los casos es inferior al 70%. El mayor porcentaje de acierto corresponde a la notación 7.5YR6/4.

Tabla 4.2: Agrupaciones de patrones del análisis de atributos

Tono	n	Notación Munsell	n	Acierto	%
5YR	117	5YR5/3	26	0	0.0
		5YR6/3	69	1	1.5
7.5YR	174	7.5YR5/3	76	18	23.7
		7.5YR6/4	23	16	69.6
		7.5YR7/4	22	5	22.7
10YR	72	10YR6/3	30	12	40.0
2.5Y	77	2.5Y6/3	46	2	4.3

El análisis descriptivo del método de asignación de color con tablas Munsell se completa con las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5. Estas tablas contienen las notaciones observadas por los evaluadores en cada muestra (columna “Observado”) y el número de veces que se ha asignado cada una de dichas notaciones (columna “Frecuencia”). En cada tabla se ha marcado con un asterisco la fila donde la etiqueta observada coincide con el patrón.

Estas tablas también muestran claramente las limitaciones del método. En algunos casos, por ejemplo en el patrón 5YR5/3 el número de coincidencias fue 0, en el patrón 5YR6/3 fue 1 y en el patrón 2.5Y6/3 fue 2. En el resto de patrones los aciertos fueron superiores, aunque hablando en términos absolutos todos los casos presentan niveles de coincidencia muy bajos con el patrón.

En este punto es necesario preguntarse si los bajos porcentajes de acierto son debidos al procedimiento, al evaluador o a un efecto combinado de ambos. El AAA permite arrojar un poco de luz sobre el tema mediante tres parámetros que en la terminología se denominan coherencia por evaluador, coherencia entre evaluadores y coincidencia de los evaluadores con el estándar. Estos resultados están desglosados en los tres componentes cromáticos: tono, valor y croma.

Tabla 4.3: Patrones 5YR (5YR5/3, 5YR6/3)

5YR5/3		5YR6/3	
Observado	Frecuencia	Observado	Frecuencia
10YR5/3	51	5YR6/3	1 *
10YR5/4	47	7.5YR6/4	39
10YR6/3	28	10YR6/2	38
		10YR6/3	94
		10YR6/4	77
		10YR7/2	23
		10YR7/3	99
		10YR7/4	63

Tabla 4.4: Patrones 7.5YR (7.5YR5/3, 7.5YR6/4, 7.5YR7/4)

7.5YR5/3		7.5YR6/4		7.5YR7/4	
Observado	Frecuencia	Observado	Frecuencia	Observado	Frecuencia
7.5YR5/3	18 *	7.5YR6/4	16 *	7.5YR7/4	9 *
7.5YR5/4	40	7.5YR6/6	22	10YR7/3	21
7.5YR6/3	21	7.5YR7/4	19	2.5Y8/3	18
7.5YR6/4	69	7.5YR7/6	23		
7.5YR6/6	28	7.5YR6/3	21		
10YR6/2	25	10YR7/4	44		
10YR6/3	113				
10YR6/4	115				
10YR7/4	23				

Tabla 4.5: Patrones 10YR6/3, 2.5Y6/3

10YR6/3		2.5Y6/3	
Observado	Frecuencia	Observado	Frecuencia
10YR6/3	12 *	7.5YR7/4	32
10YR7/2	33	10YR7/3	69
10YR7/3	76	10YR7/4	83
2.5Y7/3	32	2.5Y6/3	2 *
		2.5Y7/3	28

El primer resultado es la coherencia dentro de cada evaluador y entre evaluadores (Tabla 4.6). la coherencia dentro de cada evaluador se expresa como el porcentaje de veces en que un observador en particular ha asignado la misma etiqueta Munsell a la misma muestra en las dos observaciones. Los resultados de la tabla muestran valores que van desde el 66% hasta el 86% en tono, desde el 59.5% hasta el 73.5% en valor y desde el 53.0% hasta el 71.5% en croma. Estos porcentajes son muy superiores a los porcentajes de aciertos de las tablas descriptivas de aciertos de patrones (Tablas 4.3, 4.4 y 4.5). Los resultados indican que un evaluador asigna el mismo tono en 7 u 8 muestras de cada 10, con resultados similares en los otros dos atributos cromáticos (6-7 muestras de cada 10 en valor, 5-6 muestras de cada 10 en croma). En este sentido podemos concluir que el uso de tablas Munsell permite a un usuario entrenado asignar colores de manera consistente hasta un nivel del 70% en promedio para cada una de las componentes cromáticas.

Tabla 4.6: Coherencia (%) dentro de cada evaluador y entre evaluadores

Evaluador	Tono	IC 95%	Valor	IC 95%	Croma	IC 95%
1	77.5	73.4 - 81.3	59.5	54.8 - 64.0	53.0	48.3 - 57.7
2	80.4	76.4 - 83.9	51.0	46.3 - 55.7	75.5	71.3 - 79.4
3	86.0	83.1 - 89.7	73.5	69.2 - 77.5	75.7	71.5 - 79.6
4	66.0	61.7 - 70.5	64.4	59.7 - 68.8	58.8	54.1 - 63.4
Entre evaluadores	26.3	22.3 - 30.6	9.1	6.6 - 12.2	5.1	3.3 - 7.6

IC = intervalo de confianza

El segundo resultado del AAA es la coherencia entre evaluadores (Tabla 4.6, fila 5). La coherencia entre evaluadores indica cuantas muestras han sido identificadas con la misma notación por lo cuatro observadores. En este parámetro se observa claramente que el atributo tono presenta porcentajes mayores que los atributos valor y croma. También muestra el carácter más restrictivo de este indicador con respecto a la coherencia dentro de cada evaluador.

El tercer resultado del AAA es la coincidencia entre los evaluadores y el patrón (Tabla 4.7). Este parámetro indica el porcentaje de coincidencia de cada evaluador con el patrón, así como el porcentaje de coincidencia de todos los evaluadores con el patrón.

La coincidencia de cada evaluador con el patrón se encuentra en las cuatro primeras

Tabla 4.7: Porcentaje de coincidencia (%) con el patrón dentro de cada evaluador y conjunta para todos los evaluadores

Evaluador	Tono	IC 95%	Valor	IC 95%	Croma	IC 95%
1	18.3	14.8 - 22.2	20.3	16.6 - 24.3	19.4	15.8 - 23.3
2	25.8	21.9 - 30.2	16.5	13.2 - 20.2	22.7	18.9 - 26.9
3	22.1	18.3 - 26.2	11.4	8.6 - 14.7	39.4	34.9 - 44.1
4	23.8	20.0 - 28.1	27.2	23.1 - 31.5	33.4	29.1 - 38.0
Evaluadores/Patrón	6.7	4.6 - 9.4	1.6	0.6 - 3.2	2.0	0.9 - 3.8

IC = intervalo de confianza

filas de la Tabla 4.7. En este caso la diferencia entre las coincidencias en los tres atributos cromáticos no está clara. Un evaluador coincidió más en el atributo tono, otro evaluador coincidió más en el atributo valor y dos observadores presentan mayores porcentajes de coincidencia en el atributo croma. Las diferencias entre estos tres porcentajes de coincidencia para cada atributo de color no son importantes.

El último y más restrictivo indicador es el porcentaje de coincidencia de todos los evaluadores en conjunto con el patrón (Tabla 4.7, fila 5). La restricción se produce porque además de coincidir con el patrón los cuatro evaluadores deben coincidir entre ellos.

Este último resultado sí que presenta diferencias claras en cada uno de los atributos cromáticos. El porcentaje de coincidencia en tono es claramente mayor que los porcentajes en los atributos valor y croma. No obstante, en términos absolutos los porcentajes siguen siendo muy bajos. Este resultado coincide parcialmente (en el atributo tono) con experimentos previos sobre distinción de atributos cromáticos donde se concluye que el tono y el valor son los atributos más fáciles de distinguir (Melgosa et al., 2000).

4.3 Equipo de laboratorio

En el Capítulo 2 se describían las características que debe incluir la especificación de un sistema de medición del color. Existen tres parámetros que se deben indicar obligatoriamente en cualquier experimento de color: tipo de observador, geometría de observación e iluminante.

En el caso del presente trabajo las mediciones se han llevado a cabo en las siguientes condiciones:

- Observador: 2°
- Geometría: $45^\circ/0^\circ$ direccional
- Iluminante: D65

Los conceptos de “observador 2° ” u “observador estándar 1931” y de “geometría de iluminación $45^\circ/0^\circ$ ” ya han sido convenientemente reseñados. En esta sección se detalla el modelo de fuente de luz que hemos utilizado en los experimentos.

Las diferencias entre “iluminante”, “simulador” y “fuente de iluminación”, así como el procedimiento recomendado para evaluar la calidad de las realizaciones de fuentes de luz no estandarizadas también son conocidos. Una cuestión destacable es la recomendación de la CIE sobre el uso de fuentes de luz D65 para los experimentos de color, aún cuando no existe una especificación oficial (Harold, 2001; CIE, 2004). Esta recomendación es la que hemos seguido en este trabajo.

Los simuladores de luz D65 se presentan en forma de tubos fluorescentes en diversos tamaños y formas. En nuestro caso hemos elegido tubos de 60 cm de longitud los cuales se pueden integrar fácilmente en una cabina de luz de tamaño manejable en el laboratorio que incluso se puede transportar de manera relativamente cómoda a otros laboratorios.

En el mercado existen fuentes de luz D65 de diferentes prestaciones. Entre ellos se deben seleccionar modelos que cumplan los requisitos técnicos para realizar experimentos colorimétricos. El parámetro utilizado para determinar si una fuente de luz cumple con dichos requisitos es el índice de representación de color o *colour rendering index* (CRI). El CRI se representa con la notación R_a y se calcula con datos colorimétricos observados sobre una colección de fichas de color denominadas tests.

El Vocabulario Internacional de la Iluminación define los conceptos de representación del color en general (*General Color Rendering*) e índice de representación del color (*Color Rendering Index*) en los siguientes términos (CIE, 2009):

- Representación del color. Efecto de un iluminante sobre la apariencia del color de los objetos por comparación con la apariencia de color de dichos objetos bajo un iluminante de referencia
- Índice de representación del color. El índice de representación del color R_a se calcula como la media aritmética de los índices de representación de color específicos de los tests de color y se asocia al iluminante con el cual se ha realizado el experimento

El CRI de una fuente de luz indica la calidad en la reproducción de los colores cuando son observados bajo dicha luz. Los valores más altos indican una mejor percepción y por tanto serán los que se deben usar en Colorimetría. Es conveniente destacar que el CRI es un parámetro adecuado en fuentes de luz con espectro continuo, pero no se debe utilizar con otras fuentes de luz con espectros discontinuos en bandas estrechas como los LED, los cuales se utilizan cada vez más en todo tipo de aplicaciones. Los métodos más modernos de cálculo de R_a intentan evitar este problema mediante el uso de transformaciones con modelos de apariencia de color (Pointer, 2004).

Las fuentes de luz deben disponer de una etiqueta impresa y visible en alguna parte de la propia fuente que incluye un código internacional de color estándar. Esta codificación permite determinar si la fuente de luz es adecuada. El código de la fuente de luz utilizada en esta tesis es L BIOLUX[®] 18W/965. Se trata de un simulador de luz diurna que se utiliza en aplicaciones biológicas como terrarios o invernaderos.

La codificación se divide en varios campos. El primero “L BIOLUX[®]” es el nombre comercial. El segundo se divide a su vez en dos campos separados por una barra. El campo a la izquierda de la barra indica la potencia en W consumida por la fuente de luz. El tercer y último campo situado a la derecha de la barra es el código internacional de color compuesto por tres dígitos y dividido en dos items.

El dígito de la izquierda indica el índice de reproducción de color R_a . El valor 9 indica que la fuente de luz tiene un R_a superior al 90% el cual es adecuado para experimentos de color. La información técnica indica de hecho que el valor R_a es superior al 95% (OSRAM, 2013). Los dos últimos dígitos indican la temperatura de color de la luz emitida

por la fuente. El número 65 indica una temperatura de 6500K. Este último campo es el más importante en esta tesis y en general en cualquier experimento de medida del color. Siempre se seleccionarán fuentes de luz con el código 965 para realizar experimentos de color con muestras de suelo.

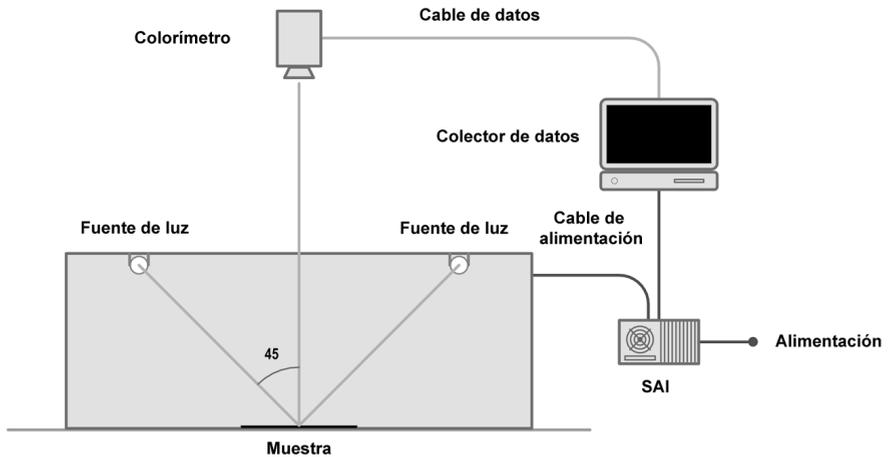


Figura 4.6: Componentes del equipo de laboratorio

Una vez definidas las especificaciones del equipo de laboratorio: observador, geometría e iluminante, es necesario construir un equipo que permita realizar las lecturas de color. La Figura 4.6 muestra el diagrama del equipo de laboratorio completo.

El equipo está formado por tres componentes fundamentales:

1. Colorímetro.
2. Cabina de color
3. Colector de datos

El colorímetro es el componente más importante del equipo. Es el instrumento que permite obtener las coordenadas cromáticas Y_{xy} de una manera precisa y objetiva. Las características de los colorímetros triestímulo se describieron en el Capítulo 2.

La cabina de color constituye el entorno de trabajo donde se disponen las muestras que serán observadas con el colorímetro. Esta cabina está diseñada para mantener una geometría de iluminación constante y por tanto eliminar la incertidumbre asociada a iluminaciones cambiantes como la luz diurna. La cabina esta forrada internamente con material acromático para no contaminar la iluminación procedente de las fuentes de luz. El material es mate, lo cual evita reflejos que podrían influir en los valores observados.

El colector de datos no es estrictamente un elemento necesario en un equipo de medición del color. Sin embargo, todos los equipos modernos permiten algún tipo de almacenamiento electrónico, lo cual agiliza el trabajo de laboratorio. En nuestro caso particular consideramos que sí es un elemento necesario para poder crear datos en formato digital. Hemos utilizado como colector de datos un ordenador PC estándar. La carga de computación requerida para la lectura y almacenamiento de datos es muy baja y por tanto cualquier PC, incluso un modelo antiguo, puede hacer la función de colector de datos. La comunicación entre el colector de datos y el colorímetro se lleva a cabo con un cable de comunicación serie RS-232C.

El equipo se completa con un dispositivo denominado sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) o fuente de alimentación universal. Este dispositivo añade dos características al equipo de laboratorio. En primer lugar proporciona energía eléctrica incluso en caso de corte del suministro eléctrico. En segundo lugar, y más importante, proporciona energía con voltaje e intensidad constantes lo cual hace que las fuentes de luz siempre operen en las mismas condiciones y por tanto emitan luz uniforme.

Una última cuestión relacionada con el equipo de laboratorio es el correcto uso del mismo. En este sentido hay que seguir las recomendaciones de los fabricantes del equipo en cuanto a la correcta utilización. El aspecto más importante en este sentido es la correcta temperatura de operación. En nuestro caso siempre establecemos un tiempo de precalentamiento de media hora. En este tiempo los componentes electrónicos del colorímetro, así como las fuentes de luz llegan a su temperatura constante de operación, garantizando la máxima uniformidad en las medidas de color.

4.4 Transformación entre espacios de color

En varias partes de este trabajo (Capítulo 1 y Sección 4.1) se ha indicado la dificultad de realizar asignaciones de color mediante el uso de tablas Munsell. A esta dificultad del uso regular de las tablas hay que añadir la dificultad en el tratamiento numérico del color debido al uso de notaciones alfanuméricas. Esta dificultad se hace patente al comparar los datos alfanuméricos del sistema Munsell con los espacios de color CIE cuyas coordenadas son totalmente numéricas.

El usuario del Laboratorio de Suelos debe decidir cual de los dos sistemas debe utilizar en sus experimentos. Por una parte, el sistema Munsell está completamente establecido en la práctica de la Edafología, aunque presenta limitaciones bien conocidas. Por otra parte, los espacios de color CIE tienen un marco de trabajo más riguroso y preciso en cuanto al tratamiento del color, pero requieren instrumentación específica y cierta formación extra.

En este sentido sería deseable disponer de un procedimiento para realizar tratamientos numéricos de color rigurosos y al mismo tiempo poder especificar los colores en notación Munsell. Así sería posible producir resultados consistentes y compatibles con la práctica habitual de la Ciencia del Suelo donde todavía predomina el uso de las notaciones Munsell como sistema de comunicación del color.

Es conveniente, y así lo hemos entendido en este trabajo, especificar un procedimiento preciso para realizar conversiones entre los espacios de color CIE y el sistema de notaciones Munsell. Este punto en particular supone otro problema de tipo práctico puesto que no existen funciones analíticas para realizar dicha conversión CIE \rightarrow Munsell al estilo de

las fórmulas de transformación entre los espacios XYZ, Yxy y CIELAB (Capítulo 2). Las transformaciones entre espacios CIE están muy bien documentadas en la bibliografía sobre Colorimetría básica (CIE, 2004; Malacara, 2002; Westland and Ripamonti, 2004) y se basan en operaciones geométricas y matemáticas aplicadas a espacios bien definidos desde el punto de vista métrico y analítico. El equivalente para transformar coordenadas CIE en notaciones Munsell no existe, lo cual ha llevado al desarrollo de varias aproximaciones prácticas que se indican a continuación.

La conversión entre los espacios CIE y Munsell se ha llevado a cabo a lo largo del tiempo con métodos muy diversos. Algunos de estos métodos realizan transformaciones tridimensionales, procesando los tres componentes del color, mientras que otros transforman únicamente uno de los componentes del color. La primera aproximación tridimensional propuesta en la bibliografía para este tipo de transformaciones estaba basada en el uso de tablas de referencia y métodos gráficos debido a las limitaciones de cálculo de la época (Newhall et al., 1943; Judd and Nickerson, 1967).

Existen ecuaciones que únicamente transforman una de las componentes cromáticas. Un ejemplo muy conocido es la ecuación del valor Munsell (Bridgeman, 1963) muy utilizada para medir la turbidez de líquidos, cuestión fundamental en el caso de la cerveza. Nickerson, Judd y Wyszecki desarrollaron una ecuación que convertía los valores triestímulo a valor Munsell (Bartleson, 1959). Una serie de diagramas auxiliares permitían posteriormente proyectar gráficamente el color para obtener aproximaciones de tono y chroma. En aplicaciones más recientes se utilizan fórmulas para transformar conjuntos de coordenadas CIELAB en tonos Munsell (Mahyar et al., 2010).

El enfoque más riguroso en cuanto a transformaciones entre espacios de color consiste en desarrollar fórmulas tridimensionales. Simon y Frost (1987) publicaron un algoritmo que fue implementado en un programa que utilizaron para sus experimentos de medición de materiales textiles. La transformación se realizaba entre el espacio Yxy y el espacio Munsell HVC.

Jin et al. (1991) utilizaron un enfoque basado en lógica borrosa en una aplicación orientada al diagnóstico de patologías de la lengua en la Medicina tradicional china. Estos

autores no realizaron la conversión entre espacios CIE y notaciones Munsell, sino entre valores RGB registrados con sistemas de televisión y notaciones Munsell.

Laamanen et al. (2006) desarrollaron un procedimiento parecido en muchos aspectos a los anteriores, pero tomando como dato de entrada el espectro completo de los estímulos de color. El modelo matemático de la transformación está basado en el método de mínimos cuadrados, donde el parámetro a minimizar es la distancia entre las coordenadas transformadas y los valores reales. El procedimiento incluye la modificación de las funciones de igualación de color empleadas en el cálculo.

Los espectros también se pueden transformar a notaciones Munsell con aproximaciones de base fisiológica como por ejemplo las funciones de sensibilidad de los conos y la teoría oponente de la visión (D'Andrade and Romney, 2003).

Centore (2012a) ha publicado un algoritmo en la modalidad de código abierto que convierte coordenadas en el espacio Yxy a notaciones Munsell. El algoritmo utiliza métodos de interpolación y curiosamente está basado en unas tablas de referencia publicadas en la década de 1940 (Newhall et al., 1943). Este algoritmo resulta curioso ya que es la automatización de un método de interpolación gráfica propuesto muchos años atrás.

La caracterización de dispositivos digitales, principalmente cámaras fotográficas y escáneres, también implica una transformación entre espacios de color. En este caso el objetivo es transformar espacios RGB dependientes del dispositivo en espacios CIE. En la bibliografía existen varias aproximaciones para resolver este problema, entre las cuales la más común es el uso de polinomios de grado superior (Balas, 1997; Balasubramanian, 2003). El problema se ha resuelto también con procedimientos más complejos como las redes neuronales o los modelos de reflectancia, aunque los métodos clásicos suelen funcionar tan bien como los más complejos con lo cual la utilidad práctica de éstos últimos es discutible (Westland and Ripamonti, 2004; Cheung et al., 2005).

Se observa con estos antecedentes que la transformación al espacio de notaciones Munsell tiene muchos enfoques distintos que dependen en buena medida de la aplicación del método de transformación. Se puede afirmar que en términos generales no existe una solución universalmente aceptada. También es fácil apreciar que la complejidad en cuanto

al aparato matemático y la instrumentación requerida varía de un método a otro.

En esta tesis se ha optado por una aproximación intermedia entre las opciones que se han reseñado anteriormente. Un método adecuado para el Laboratorio de Suelos requiere un método de transformación sencillo, preciso, rápido y fácilmente integrable en el flujo de trabajo habitual.

Hemos optado por la aplicación del método de clasificación de los k vecinos más próximos (kNN). Este método es sencillo, lo cual permite una fácil implementación e integración en el flujo de trabajo del laboratorio. El método es rápido si las bases de datos de entrenamiento son de tamaño reducido. Si las bases de datos fueran de gran tamaño se podrían utilizar métodos de optimización de búsqueda de manera muy similar a la utilizada en la optimización en problemas de acceso multidimensional (Gaede and Günther, 1998) aunque en nuestro caso no ha sido necesario. La facilidad de implementación también elimina la necesidad de usar programas o bibliotecas de terceras partes, lo cual facilita la integración en un entorno de trabajo específico.

El método es preciso puesto que utiliza espacios CIE y colorímetros tricromáticos. Además pensamos que se asemeja al procedimiento visual basado en tablas Munsell en dos aspectos. En primer lugar el método compara una muestra con una serie de patrones y asigna la notación del patrón más cercano a la muestra analizada. En segundo lugar la instrumentación permite observar la muestra de manera parecida a la observación humana. Es decir, el campo visual del colorímetro (Figura 4.7) cubre una porción de la muestra en la cual hay material heterogéneo que en su conjunto es promediado. Ese valor promedio es el que se compara con el valor mucho más uniforme del patrón. Es decir, usamos un método que imita razonablemente el sistema de asignación que haría un observador humano, pero eliminando la subjetividad propia de nuestro sistema de visión.

Básicamente, este método toma como entrada las coordenadas CIE de una muestra de suelo y las coordenadas de una serie de patrones. La salida es la notación Munsell de la muestra en función del conjunto de patrones más cercanos. En la Sección 4.2 se evaluó la exactitud en la asignación de colores mediante el uso de tablas Munsell en base a una serie de patrones que representaban los valores más parecidos a la realidad. Precisamente la



Figura 4.7: Muestra de suelo observada a través del colorímetro

definición de patrones se llevó a cabo con el método kNN, lo cual aporta una ventaja adicional que consiste en la posibilidad de definir coordenadas colorimétricas sin intervención del sistema visual humano.

El algoritmo kNN es una de las técnicas más sencillas y al mismo tiempo más importantes entre los métodos utilizados en aprendizaje automático (*machine learning*) y en análisis y minería de datos (*data mining*). A pesar de su sencillez en ciertas circunstancias puede competir con otros métodos mucho más complejos como por ejemplo el SVN (Steinbach and Tan, 2009). Este algoritmo se utiliza en problemas de clasificación y de agrupación de datos. En nuestro trabajo lo utilizaremos como método de clasificación.

El algoritmo se basa en el cálculo de distancias entre una muestra (llamada test en la terminología) y un conjunto de patrones que forman la base de datos de entrenamiento. Los patrones son objetos cuya clasificación es conocida y por tanto pertenecen a una clase, grupo o categoría conocida. La clase a la que pertenece cada objeto se indica con una etiqueta, por ello se dice que los objetos de la base de datos son “objetos etiquetados”.

Una vez calculadas las distancias se selecciona un subconjunto con los k objetos pertenecientes a la base de datos de entrenamiento más cercanos al test. Este subconjunto de k objetos cercanos determinará la clase a la que pertenece el test.

La asignación de la clase a la muestra test se realiza con un procedimiento de recuento entre los k vecinos más próximos seleccionados en el paso previo. Una vez hecho el recuento la clase más “votada” será la clase asignada al test (Figura 4.8).

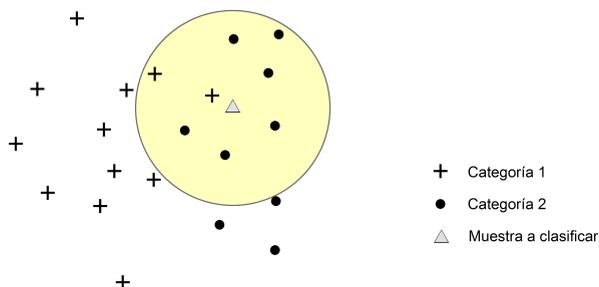


Figura 4.8: Representación gráfica del método de clasificación kNN

La complejidad de almacenamiento del método es $O(n)$ puesto que es necesario cargar en memoria las n muestras del conjunto de entrenamiento. La complejidad temporal también es $O(n)$ puesto que hay que calcular las distancias desde el objeto a clasificar hasta las n muestras de entrenamiento (la notación $O(n)$ indica “proporcional a n ”). Este algoritmo no requiere tiempo de establecimiento, lo cual lo distingue de otros métodos más complejos (Steinbach and Tan, 2009).

Aunque a primera vista no resulte evidente, el método kNN es fácilmente adaptable al problema que se presenta en esta sección. Recordemos que el objetivo es transformar un color, expresado por sus coordenadas CIE XYZ, CIE Y_{xy} o CIELAB, a su notación Munsell correspondiente. La transformación entre los dos espacios se llevará a cabo mediante la clasificación de la muestra a transformar.

El espacio CIE utilizado puede ser cualquiera de los tres mencionados en el párrafo anterior. Sin embargo preferimos el CIELAB frente al CIE Y_{xy} y sobre todo frente al

CIE XYZ, puesto que el primero permite obtener fácilmente correlatos psicofísicos del color y por tanto la interpretación de resultados desde el punto de vista del sistema visual humano es más clara. A continuación se hará referencia a coordenadas CIELAB, teniendo en cuenta que se podría sustituir por coordenadas Yxy o incluso por coordenadas XYZ.

En términos del método kNN, el color que se transformará a notación Munsell hará el papel del test. Por otra parte, la base de datos de entrenamiento contendrá una serie de objetos cuyas coordenadas CIELAB (posición) y notación Munsell (clase) son conocidas. Esta base de datos de entrenamiento se puede generar básicamente de dos maneras.

Una primera opción es recopilar muestras que hayan sido asignadas con el procedimiento clásico mediante las tablas Munsell. Estos datos suelen estar disponibles en los laboratorios de análisis de suelos. En este caso será necesario observar de nuevo las muestras con el colorímetro para añadir las coordenadas CIE. La base de datos estará compuesta por tantos registros como muestras disponibles y cada registro contendrá el identificador de la muestra, las coordenadas CIE y la etiqueta Munsell.

Esta opción tiene las ventajas y desventajas derivadas principalmente de la intervención de observadores humanos. Hemos visto previamente en este capítulo que los errores de asignación entre observadores puede ser considerable y que por tanto no se puede evitar la subjetividad del procedimiento. Por contra, con esta opción sería posible crear bases de datos de gran tamaño, con la posibilidad de aumentar el tamaño de cada clase Munsell, lo cual permitiría posiblemente compensar las anomalías de cada uno de los observadores.

Esta opción se utilizó en dos trabajos previos con distintos tamaños de la base de datos (Ibáñez et al., 2009; Marqués et al., 2010). El funcionamiento del método fue correcto pero una de las conclusiones fue que el tamaño de cada clase Munsell debía ser al menos de 30, lo cual es un requerimiento que no siempre se puede cumplir. Si las notaciones Munsell de las muestras que conforman la base de datos están disponibles en algún tipo de archivo será viable seleccionar grupos de un tamaño determinado, aunque esto no siempre será posible. Si las muestras se deben recolectar en campo para crear una base de datos es todavía más difícil porque nada garantiza que *a priori* sea posible seleccionar muestras

repartidas sobre todo el espacio de las fichas de color. Los porcentajes de acierto máximos del método, calculados mediante validación cruzada, están entre el 75% y el 80%.

La segunda opción es más sencilla y práctica. La base de datos se forma observando la colección completa de fichas Munsell con el colorímetro (Figura 4.9). El tamaño de la base de datos de entrenamiento será igual al número de fichas de la tabla Munsell, que ha sido de 322 fichas en la versión de las tablas que hemos utilizado (Munsell Color, 1994), y por tanto habrá una única ocurrencia de cada clase Munsell pero por contra todas las fichas estarán incluidas en la base de datos.



Figura 4.9: Observación de las tablas Munsell a través del colorímetro

La única desventaja de esta segunda opción es que sólo hay un registro por cada etiqueta Munsell, el resto de aspectos son ventajosos. En particular cabe destacar que la observación de fichas de color es más cómoda y rápida que la observación de muestras de suelo y sobre todo que el espacio de color Munsell está completamente cubierto, cuestión no garantizada con bases de datos formadas por observación visual de muestras de suelo. Este segundo enfoque fue el utilizado para crear los patrones del análisis de coincidencia de atributos mencionado anteriormente en la Sección 4.2.

Existen conjuntos de datos disponibles en las páginas web de las instituciones más

destacadas en el ámbito de la Colorimetría que contienen listados de observaciones y coordenadas cromáticas o incluso programas de ordenador con tablas de referencia que permiten realizar transformaciones entre notaciones Munsell y otros espacios de color (Viscarra Rossel et al., 2006). Estos datos se pueden utilizar en algunos experimentos de color, sin embargo hemos preferido repetir las mediciones de las fichas de color Munsell, aún sabiendo que están disponibles fácilmente.

La razón de hacer nuestras propias mediciones es adaptarlas a las condiciones específicas de nuestro laboratorio. En este sentido la página web del *Munsell Color Science Laboratory* (MCSL) indica lo siguiente al referirse a los ficheros de datos disponibles:

“None of these data should be confused with actual measurements from a Munsell Book of Color!”

4.5 Desarrollo de la aplicación informática

La información proporcionada hasta aquí, tanto en el presente capítulo como en los anteriores, ha servido como marco para desarrollar una aplicación informática que es de hecho la que hace posible integrar todas las piezas. La aplicación permite una conexión directa con el colorímetro a través de la cual obtiene datos de color de cada muestra en el espacio de color Yxy. Asimismo, permite obtener la posición espacial de cada muestra a partir de una base de datos de coordenadas que el usuario debe proporcionar. El resultado final es un conjunto de datos que contiene información espacial e información colorimétrica en un formato de datos geográfico, listo para ser usado o para incluirse en una base de datos espacial de mayor entidad.

Los criterios que se han seguido en el desarrollo han sido básicamente dos. El primero es la sencillez de uso. Este aspecto es importante para que un usuario nuevo pueda ser productivo desde el primer momento. El interfaz gráfico de la aplicación es muy sencillo y prácticamente no requiere ni siquiera manual de instrucciones (Figura 4.10). Una sencilla hoja de instrucciones con un ejemplo es suficiente para que cualquier usuario sea capaz de manejar el programa. Este punto puede ser interesante para usos docentes, así como para investigación.

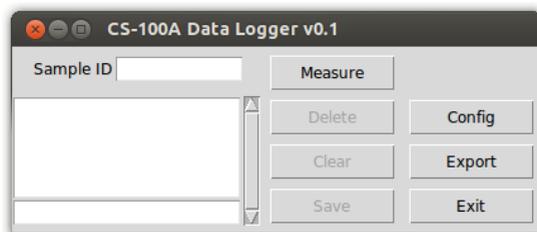


Figura 4.10: Interfaz del programa de recolección de datos

El segundo criterio, derivado del primero es reducir el tiempo de procesamiento de los datos, tanto en el Laboratorio de Color como en las etapas inmediatamente posteriores. El ahorro de tiempo en la medida del color es evidente al acceder electrónicamente a las funciones de medición del colorímetro. El programa además está pensado para hacer series de mediciones y calcular el valor medio de cada serie. Esta característica se adapta perfectamente a la rutina de observación definida en la Sección 4.1 donde se recomienda realizar series de tres mediciones para compensar el efecto de la textura del material.

Las etapas posteriores a la medición del color consisten en enlazar los datos colorimétricos con la posición espacial de cada muestra para crear los mapas de puntos de muestreo. Esta operación se realiza automáticamente siempre y cuando el usuario se encargue de mantener la base de datos de coordenadas actualizada.

El programa mantiene un registro de todas las operaciones de lectura de cada sesión en un fichero *log* auxiliar y guarda los promedios de las series de lecturas en la base de datos que posteriormente se enlazará con la información espacial. Una ventaja añadida de este programa es que evita errores de operación relativamente comunes en el trabajo de laboratorio, especialmente en sesiones largas donde la fatiga puede aparecer. El programa evita la introducción de identificadores de muestra repetidos y por supuesto al comunicarse directamente con el instrumento también se evitan errores de anotación.

A pesar de todas las características de la aplicación, que entendemos ventajosas para el trabajo de laboratorio, no hay que olvidar que se trata de un prototipo. A lo largo del tiempo ha sufrido evoluciones y mejoras derivadas directamente del trabajo de laboratorio, aunque todavía queda mucho margen de mejora. El número de versión que hemos

asignado a la aplicación (0.1) así lo indica. Sin embargo, el hecho de ser un prototipo no significa que alguna de las operaciones esenciales esté ausente. El programa es totalmente funcional pero presenta ligeras diferencias con programas comerciales.

El planteamiento de la tarea de desarrollo de una aplicación requiere un esfuerzo que hay que valorar. En nuestro caso decidimos que era conveniente dar este paso y desarrollar una aplicación adaptada a nuestras necesidades. Antes de dar el paso evaluamos las aplicaciones existentes. El fabricante del colorímetro disponía de dos productos para realizar lecturas a través del puerto RS-232C.

Una de ellas era gratuita pero tenía unas prestaciones muy pobres y además requería mucho trabajo manual para almacenar los datos. La segunda opción era mucho mejor pero su precio era elevado, del orden del precio del propio colorímetro. Este producto no permitía almacenar datos espaciales. Estas razones y las limitaciones presupuestarias nos hicieron desestimar la adquisición de la aplicación de pago.

Finalmente decidimos que era necesario desarrollar una aplicación a medida que ha resultado de gran utilidad para el trabajo rutinario del Laboratorio de Suelos. Algunos de los detalles de esta aplicación se encuentran en el Apéndice A.

4.6 Procedimiento propuesto

Este punto supone la culminación a todo el material presentado en las páginas anteriores. En el título de la tesis se habla del desarrollo de un procedimiento para medir el color del suelo que se presentará a continuación con la ayuda de un diagrama de flujo estándar (ISO, 1985).

A lo largo de todo el trabajo se ha intentado mantener una visión global del tratamiento del color de las muestras de suelo. Este enfoque incluye la salida a campo, la preparación de muestras, la medida de color, el tratamiento de la posición espacial y la inclusión en la base de datos espacial. Las denominaciones y etiquetas que se indican a continuación se refieren al diagrama de la Figura 4.11.

La salida a campo es necesaria para recolectar las propias muestras de suelo. En estas salidas se deben recopilar además otras variables que podrán ser importantes en

etapas posteriores del procesamiento. Entre todas ellas destaca la posición geográfica, fundamental para conformar la base de datos de coordenadas asociadas a las medidas de color. El usuario debe recolectar las coordenadas en campo, preferentemente con receptores GNSS en formato electrónico.

Una vez llegan las muestras al laboratorio comienza nuestro procedimiento en el sentido estricto. La primera operación es la preparación de la muestra mediante tamizado con tamaño de malla de 2 mm. La mayor parte de esa muestra se guardará en el almacén y pasará a formar parte de la colección de muestras del laboratorio.

Una parte de la muestra se destinará a realizar los análisis físicos y químicos habituales. Asimismo, una pequeña parte del material se dispondrá en un contenedor que se utilizará posteriormente en los análisis de color del suelo. Estas operaciones de preprocesamiento de las muestras de campo se llevan a cabo en el Laboratorio de Suelos y requieren intervención manual representada con el proceso etiquetado como “Procesamiento de muestras de suelo”.

Una de las tareas necesarias es recopilar las coordenadas de los puntos de muestreo. Este proceso se puede llevar a cabo en paralelo al preprocesamiento de las muestras. El resultado de la recopilación de coordenadas es un fichero electrónico, independientemente del método utilizado en la recolección de las coordenadas, localizado en un lugar específico y que representamos con la etiqueta “BDC” (base de datos de coordenadas).

Los restantes pasos del procedimiento se llevarán a cabo en el Laboratorio de Color tal y como se especifica en el diagrama. Antes de proceder a las mediciones propiamente dichas se deberá preparar el laboratorio. La preparación consiste en las siguientes operaciones:

- Limpieza de la cabina de color
- Conexión del equipo durante un mínimo de 30 minutos
- Transporte de los contenedores con muestras al laboratorio

Una vez preparado el laboratorio y aislado de cualquier fuente de contaminación lumínica se realizará la preparación de la muestra en la placa Petri (Figura 4.4). Se debe añadir una cantidad de material adecuado para la correcta manipulación evitando en todo momento

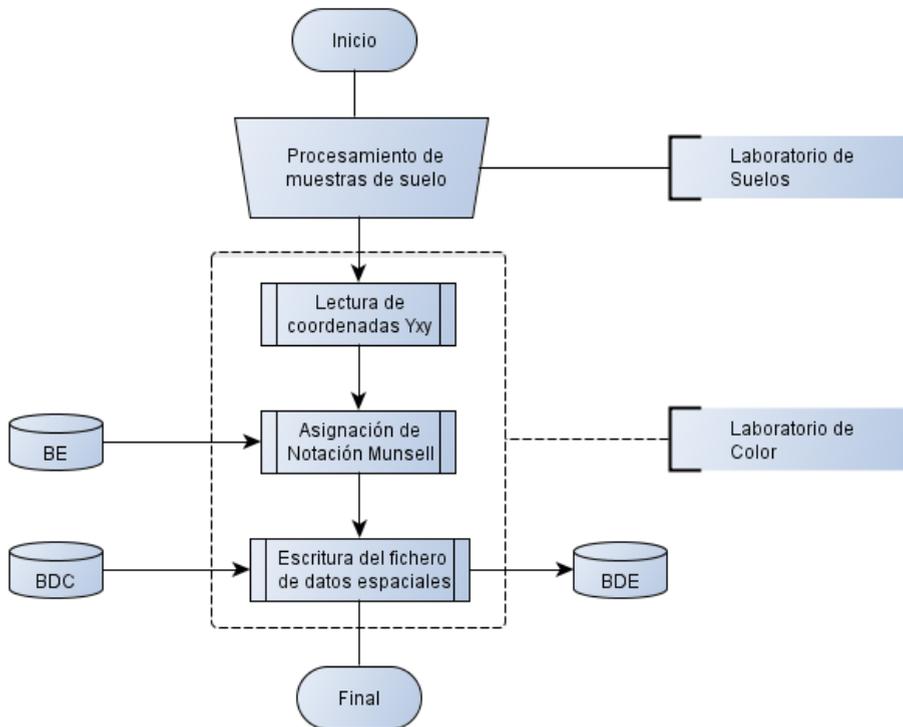


Figura 4.11: Diagrama de flujo del procedimiento propuesto

formar nubes de polvo. Una vez el material está en la placa de preparación se agitará suavemente para formar una superficie relativamente homogénea y se realizará finalmente la medición.

Es importante recordar que la secuencia de medición (agitar muestra y medir color) se realizará tres veces para obtener un valor medio con el que se creará la base de datos de color. También es importante intercalar algunas mediciones del blanco de referencia entre las mediciones de las muestras, por ejemplo cada 10 muestras de suelo intercalar una medición del blanco de referencia.

Estas medidas del blanco de referencia tienen una doble aplicación. En primer lugar deben realizarse si el usuario pretende transformar posteriormente las coordenadas de color al espacio CIELAB. En segundo lugar también se deben realizar para evitar efectos

memoria del instrumento al medir una secuencia muy larga de colores parecidos. Este conjunto de operaciones constituyen el proceso que se ha etiquetado como “Lectura de coordenadas Y_{xy} ”.

El segundo paso es la conversión de las coordenadas Y_{xy} a notación Munsell con el método de clasificación kNN. Este paso se realiza por cuestiones de “compatibilidad” con la práctica habitual en la Ciencia del Suelo aunque no es obligatorio desde el punto de vista del tratamiento posterior de los datos. El proceso está representado con la etiqueta “Asignación de Notación Munsell” en el diagrama de flujo.

Es necesario tener en cuenta que la transformación basada en el método kNN requiere el mantenimiento de una base de datos de entrenamiento. Este conjunto de datos de entrenamiento debe proporcionarlo el usuario. Si el programa CS-100C no encuentra el fichero que contiene los datos de entrenamiento presenta un mensaje de advertencia, pero la ejecución continua con normalidad. El conjunto de datos de entrenamiento debe estar almacenado en formato digital y está etiquetado como “BE” (datos de entrenamiento).

El tercer y último paso del procedimiento es la escritura de los datos de color y los datos espaciales en un fichero conjunto. El proceso ha sido etiquetado como “Escritura del fichero de datos espaciales”. Este proceso sólo será posible si existe una base de datos de coordenadas que en el diagrama se etiqueta como “BDC” (base de datos de coordenadas). El proceso toma los datos del color de los pasos previos y busca sus coordenadas espaciales en la BDC mediante el identificador único de cada muestra.

Si el programa no encuentra las coordenadas de una muestra en particular se imprimirá un mensaje de advertencia y continuará la ejecución, intentando asignar las coordenadas espaciales al resto de muestras. Si el programa no encuentra la base de datos de coordenadas presentará un mensaje de error y abortará la ejecución.

Si todos los datos auxiliares (BE y BDC) están disponibles, el resultado es un mapa de entidades puntuales etiquetado como “BDE” en el diagrama de flujo.

En resumen, el procedimiento de medición del color propuesto consta de tres pasos:

1. Medir las coordenadas Y_{xy}
2. Obtener la notación Munsell

3. Crear el mapa de puntos

Estos tres pasos no se ejecutan en paralelo. El primero de ellos es una tarea secuencial en la cual se deben obtener las coordenadas de todas las muestras que conforman un proyecto o estudio concreto. La observación del total de muestras puede llevarse a cabo en una o en varias sesiones.

Los pasos 2 y 3 se ejecutan simultáneamente. El programa de aplicación realiza de hecho los dos pasos al pulsar el botón “Export” (Figura 4.10). Este proceso formado por los pasos 2 y 3 es totalmente automático y requiere menos intervención del usuario, sobre todo comparándolo con el paso 1 en el que la secuencia de medición requiere que el usuario introduzca la muestra en la cabina y la retire para proceder a las mediciones siguientes.

Las operaciones anteriores se deben plasmar en un documento de fácil lectura, por ejemplo una hoja de instrucciones junto con un formulario, donde se especifiquen de manera clara las operaciones que debe ejecutar el usuario del laboratorio, desde la conexión de los instrumentos hasta la secuencia de medición. La confección de estas instrucciones tiene múltiples ventajas.

En primer lugar son un elemento que permite el aprendizaje y de alguna manera la “filosofía” de trabajo del laboratorio. Este punto es fundamental si se desea utilizar esta tecnología para propósitos docentes (proyectos fin de carrera) o de investigación (toma de datos para tesis doctorales o estudios de investigación).

Aquellos que se enfrenten por primera vez a las tecnologías de medida del color encontrarán muy útiles unas instrucciones que contengan toda la información. Asimismo, las instrucciones serán una herramienta de comunicación y de cooperación entre tutor y alumno que además evitará potenciales errores de procedimiento en la práctica rutinaria.

Por último, consideramos que las instrucciones de laboratorio contribuyen a crear una manera de hacer las cosas que en ciertas disciplinas analíticas se conoce como “buenas prácticas de laboratorio” (Fox, 2003). La observación de todas estas recomendaciones permite en definitiva obtener datos de laboratorio de manera rigurosa, además de garantizar el buen uso y la conservación de todo el material del laboratorio.

Capítulo 5

Conclusiones y perspectivas futuras

En esta tesis se ha conseguido el objetivo planteado inicialmente que consistía en el desarrollo de un procedimiento que combina tecnologías de medición del color, tecnologías de tratamiento de la información espacial y tecnologías de la Ciencia del Suelo, proporcionando un conjunto de información listo para ser incluido en una base de datos espacial.

Para conseguir este objetivo ha sido necesario examinar aspectos teóricos y prácticos de Colorimetría, estudiar el flujo de trabajo típico del levantamiento de suelos, integrar diversos dispositivos y varios conjuntos de datos en un formato de fichero adecuado, desarrollar una aplicación informática e incluso hacer algo de bricolaje. También ha sido necesario aplicar una visión interdisciplinar y organizar el trabajo conjunto de personas procedentes de las áreas de Colorimetría, Edafología y Cartografía.

El enfoque propuesto ha sido global, para lo cual se ha prestado especial atención a las necesidades reales del usuario del Laboratorio de Suelos interesado en la medida rigurosa del color de las muestras de suelo. Asimismo, se ha intentando reunir toda la información de consulta necesaria para comprender cada paso del procedimiento como material de apoyo al procedimiento.

En nuestra opinión, este enfoque global no existe como tal en la bibliografía actual. Las referencias contenidas en la bibliografía tratan sobre Colorimetría, Ciencia del Suelo o Cartografía. Unas pocas referencias están a medio camino entre Colorimetría y Ciencia del Suelo o entre Ciencia del Suelo y Cartografía. Nuestro enfoque integra las tres disci-

plinas y en este sentido pensamos que este trabajo puede ser útil para aquellos interesados en el tratamiento del color del suelo como variable espacialmente distribuida.

Las conclusiones de esta tesis son:

- El procedimiento propuesto cubre todas las necesidades del usuario del Laboratorio de Suelos interesado en la medida precisa del color
- El uso de tablas Munsell presenta limitaciones en la asignación del color
- El método kNN se ha mostrado adecuado para la obtención de notaciones Munsell
- La aplicación informática desarrollada reduce el tiempo necesario para combinar información colorimétrica e información espacial
- La cabina de color fabricada para realizar los experimentos se adapta perfectamente a las características de las muestras de suelo

Discusión

Se ha propuesto un procedimiento para crear bases de datos espaciales con información colorimétrica de muestras de suelo. El procedimiento es global en el sentido que analiza todos los aspectos fundamentales del proceso: trabajo de campo, trabajo de laboratorio y tratamiento automático de la información.

Uno de los aspectos estudiados es el método utilizado para asignar colores a las muestras. El método colorimétrico mediante el uso de espacios de color CIE y colorímetros tricromáticos es el que ofrece mayor rigor en la medida y tratamiento del color, así como las mayores posibilidades de automatización e integración en el flujo de trabajo de laboratorio. Este enfoque proporciona un procedimiento rápido, barato en comparación con otros equipos de laboratorio, como por ejemplo los espectrofotómetros, y con un tiempo de aprendizaje rápido para el usuario.

En contraposición está lo que podríamos denominar el método clásico de asignación de color basado en el uso de tablas Munsell. Este método presenta claras limitaciones que sin embargo no han sido cuantificadas previamente en estudios sistemáticos. El análisis

de coincidencia de atributos de la Sección 4.2 cuantifica dichas limitaciones. En el texto también se han indicado las claras ventajas del uso de tablas Munsell, bien conocidas y muy extendidas en la práctica habitual de la Agronomía y Ciencia del Suelo.

La opción tomada en este trabajo de investigación ha sido compatibilizar ambos métodos de medida. El trabajo rutinario de medición del color se llevará a cabo con el enfoque CIE, más preciso, pero el usuario tiene la posibilidad de transformar las coordenadas cromáticas en notaciones Munsell. En esta línea se ha desarrollado un mecanismo innovador para convertir los espacios de color CIE en notaciones Munsell. Este mecanismo toma elementos de las técnicas de aprendizaje automático para poder imitar de algún modo el proceso de asignación de color basado en el sistema visual humano. El mecanismo encaja perfectamente en el procedimiento general.

En otro orden de cosas, una de las características de las muestras de suelo es su carácter espacial. Una muestra está localizada en el terreno y por tanto su integración en una base de datos espacial es algo natural. Esta naturaleza espacial también ha sido un punto fundamental de este trabajo. El procedimiento propuesto permite enlazar datos de color y coordenadas geográficas de cada muestra mediante el uso del programa de aplicación desarrollado.

El desarrollo de dicha aplicación aporta un enfoque moderno en el tratamiento de datos, permitiendo automatizar al máximo el trabajo de toma y procesamiento de datos. La aplicación permite procesar información recolectada directamente desde el colorímetro y combinarla con las posiciones espaciales de las muestras almacenadas en una base de datos de coordenadas independiente. La aplicación desarrollada elimina la intervención del usuario para realizar el enlace de los datos de color y los datos espaciales que sería necesaria en otra situación.

Por último, las características del material que compone las muestras de suelo también han sido tenidas en cuenta. Se ha diseñado y fabricado una cabina de color adaptada a la medida del color de muestras de suelo, intentando mantener las geometrías de iluminación recomendadas por el fabricante del instrumento utilizado en la medición de los colores y al mismo tiempo proporcionar un entorno de trabajo cómodo.

Más allá de los resultados directos del trabajo creemos que en esta tesis se propone una “filosofía” del tratamiento del color del suelo no existente en la bibliografía consultada. Nuestro enfoque permite un método de medida preciso que contempla todos los aspectos técnicos importantes desde los puntos de vista colorimétrico, edafológico y espacial.

5.1 Perspectivas futuras

En este punto final conviene dar una mirada retrospectiva. El objetivo de la tesis ha sido conseguido desde una óptica multidisciplinar, integrando instrumentación y técnicas aparentemente lejanas. En este trabajo han colaborado personas procedentes de varias áreas de conocimiento. Han sido necesarios esfuerzos para acercar distintos ámbitos de conocimiento y para poder encajar todas las piezas que nos interesaban. El resultado es un procedimiento comprensible por personas que se aproximan por primera vez al mundo de la Colorimetría y aplicable a situaciones de trabajo real en el Laboratorio de Suelos.

La utilidad del trabajo presentado en esta tesis es real tal y como se muestra en el Apéndice B donde se utilizó el procedimiento propuesto aquí para recolectar datos del color que se han relacionado con algunos factores formadores del suelo. Sin embargo todavía quedan algunas preguntas por responder. Por ejemplo ¿Es posible mejorar el procedimiento? ¿Es posible aprovechar total o parcialmente el esfuerzo y resultados presentes en esta tesis en otras aplicaciones afines? A continuación se proponen posibles líneas de trabajo futuro que responden a estas preguntas.

Desarrollo de la aplicación informática

En el texto se indicó que el programa de aplicación desarrollado en esta tesis es un prototipo. En el desarrollo se priorizó la implementación de funciones para la lectura de datos del colorímetro, el enlace de datos colorimétricos y espaciales y la escritura en formatos de datos espaciales. Estos tres aspectos son sin duda los más importantes y el programa los realiza correctamente.

La facilidad de manejo es un punto claro de mejora. La posibilidad de mejorar el interfaz gráfico, aumentando el número de cuadros de diálogo para organizar mejor los

ficheros de observaciones sería la primera tarea en este sentido.

Otra mejora sería aumentar el número de colorímetros compatibles con el programa. En la actualidad el único instrumento al cual se puede acceder por el cable de comunicaciones es el Konica Minolta CS-100A. Este fue el único instrumento disponible y por tanto nuestro interés se centró en él.

La posibilidad de poder trabajar con más instrumentos le daría más calidad al programa, pero hay que recordar lo dicho en el Capítulo 2 en lo referente a la disponibilidad de información por parte del fabricante. En muchos casos dicha información no existe.

Aplicación del procedimiento en exteriores

A lo largo del presente texto se ha indicado en varias ocasiones que la luz natural introduce un elemento de incertidumbre en la medida del color. No obstante la idea de poder trasladar este procedimiento a espacios abiertos con luz natural es muy atractiva. Evidentemente la cabina de color no se puede trasladar a exteriores y por tanto es necesario poder determinar de alguna forma las características de la luz ambiental en el momento de observar el color de las muestras.

Ésta es claramente una línea de trabajo futura, que en la actualidad no está totalmente resuelta y donde existen varias aproximaciones al problema. En cualquier caso se requieren métodos pertenecientes al área de Colorimetría avanzada.

Algunas ideas propuestas en la bibliografía son el uso de los modelos de apariencia de von Kries (Balasubramanian, 2003), el estudio de invariantes o la aplicación de modelos de apariencia (Martínez-Verdú et al., 1996; Centore, 2012b) o los métodos estadísticos Bayesianos (Brainard and Freeman, 1997). Estas técnicas no se han aplicado en el ámbito de la Ciencia del Suelo.

Uso de dispositivos digitales

En último lugar mencionamos un tema que tiene un gran potencial en el contexto de esta tesis: el uso de dispositivos digitales para la medida del color. Los dos dispositivos digitales típicos son la cámara fotográfica y el escáner. En el caso de la medida de color

de muestras de suelo la cámara fotográfica digital es claramente el dispositivo de interés. El objetivo es utilizar una cámara digital en sustitución del colorímetro.

Este tema es de gran interés entre la comunidad científica y técnica como lo demuestran el gran número de publicaciones existentes. En la terminología técnica el procedimiento para poder utilizar una cámara como dispositivo de medida del color se denomina caracterización. La caracterización consiste en determinar un modelo matemático utilizado para convertir los datos digitales registrados en el espacio RGB particular de la cámara, en datos tricromáticos expresados en alguno de los espacios CIE conocidos. La gran ventaja de los espacios CIE es su independencia del dispositivo utilizado, lo cual permite comparar datos de distintos dispositivos y en definitiva realizar análisis más rigurosos.

Este proceso de caracterización permite utilizar una cámara para la medida del color en todo tipo de aplicaciones (Balas, 1997; Martínez Verdú, 2001; Balasubramanian, 2003; Westland and Ripamonti, 2004; Cheung et al., 2005). También existen referencias del uso de cámaras digitales en el área de la Ciencia del Suelo (Levin et al., 2005; Viscarra Rossel et al., 2008).

La caracterización de cámaras digitales es un tema de especial interés tanto en el Laboratorio de Suelos como en el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría donde la obtención rigurosa del color registrado por las cámaras digitales es fundamental. En este sentido destacamos que ya hemos comenzado a trabajar en el tratamiento de datos digitales. Hasta el momento nos hemos centrado en dos cuestiones básicas.

En primer lugar hemos propuesto un método estadístico para cuantificar el ruido de la propia cámara digital (Riutort-Mayol et al., 2012; Marqués-Mateu et al., 2013). El ruido es un parámetro que no se tiene en cuenta en los métodos de caracterización y que forma parte de la etapa de preprocesamiento de los datos. Parece adecuado tener un método automático para estimarlo como paso previo al proceso de caracterización.

También hemos comenzado a desarrollar una aplicación para determinar los modelos polinómicos de caracterización a partir de los datos recolectados sobre una carta de color

(Figura 5.1). El desarrollo se ha llevado a cabo en el seno de dos grupos de trabajo de la *Universitat Politècnica de València*, el CVER (Centro valenciano de Estudios sobre el Riego) y el GIFLE (Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner).

En el marco del procedimiento propuesto en esta tesis la integración de la cámara tendría lugar en el primer paso, donde sustituiría al colorímetro. En el diagrama de flujo se localizaría en el proceso etiquetado como “Medición de coordenadas Yxy” (Figura 4.11). La principal ventaja de sustituir un dispositivo muy específico como un colorímetro por otro dispositivo comercial como una cámara es el precio de adquisición. Por contra, la integración de la cámara obligará a modificar ligeramente el programa de aplicación para posibilitar el tratamiento de imágenes digitales. En este caso los valores de las coordenadas cromáticas ya no procederán directamente del colorímetro, sino del análisis de un fragmento de la imagen especificado por el usuario.

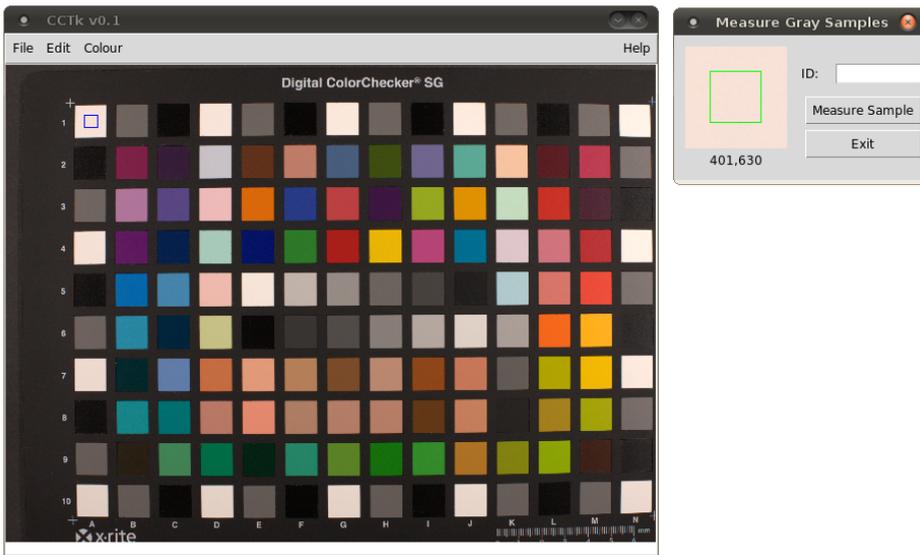


Figura 5.1: Programa de aplicación para la caracterización de dispositivos digitales

Bibliografía

- W. d. W. Abney. *Colour Measurement and Mixture*. E. & J. Young & Co., 1891.
- AENOR. *UNE 77303 Calidad del suelo: pretratamiento de muestras para análisis físico-químico*. AENOR, 1997.
- M. Aguilar y V. Blanca. *Iluminación y Color*. Universitat Politècnica de València, 1995.
- J. Albrecht. Universal analytical GIS operations - a task-oriented systematization of data structure-independent GIS functionality. In *Geographic Information Research: transatlantic perspectives*, chapter 42, pages 531–545. 1998.
- J. Albrecht. *Key concepts & techniques in GIS*. SAGE Publications, 2007.
- A. Annoni, C. Luzet, E. Gubler, and J. Ihde, editors. *Map projections for Europe*. European Communities, 2003.
- Y. Araya. The soil in oral culture: proverbs about soil and the land. *IUSS Bulletin*, (103): 39–42, 2003.
- J. Artigas and A. Felipe. On the variation of the CIELAB coordinates with luminance. *Journal of Optics*, 18(2):81–84, 1987.
- C. Balas. An Imaging Colorimeter for Noncontact Tissue Color Mapping. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 44(6):468–474, 1997.
- R. Balasubramanian. Device characterization. In *Digital color imaging handbook*, chapter 5, pages 269–384. CRC Press, 2003.
- P. Ball. *La invención del color*. DEBOLSILLO, 2009.
- C. Bartleson. Notes on the Nickerson-Judd-Wyszecki chromatic value transformation. *Journal of the Optical Society of America*, 49(5), 1959.
- J. Beck and A. Sieber. Is the spatial distribution of Mankind's most basic economic traits determined by climate and soil alone? *PLoS ONE*, 5(5):e10416. doi: 10.1371/journal.pone.0010416, 2010.
- Y. Bédard. Principles of Spatial Database Analysis and Design. In *GIS: Principles, Techniques, Applications & Management*, chapter 29, pages 413–424. Wiley, 1999.

- F. Billmeyer. Survey of color order systems. *Color Research and Application*, 12(4): 173–186, 1987.
- BIPM. *Le Système International d'Unités*. Bureau International des Poids et Mesures, 2006.
- BOE. Decreto 2303/1970 de 16 de julio, por el que se adopta la proyección Universal Transversa Mercator (U.T.M.) para la revisión y nueva edición del Mapa Topográfico Nacional. *Boletín oficial del Estado*, (202):13751–13751, 1970.
- BOE. Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. *Boletín Oficial del estado*, (207):35986–35989, 2007.
- J. Boettinger, D. Howell, A. Moore, A. Hartemink, and S. Kienast-Brown, editors. *Digital Soil Mapping*. Springer, 2012.
- M. Bond and D. Nickerson. Color-order systems, Munsell and Ostwald. *Journal of the Optical Society of America*, 32:709–719, 1942.
- J. Bowmaker, J. Parry, and J. Mollon. The arrangement of L and M cones in human and a primate retina. In *Normal and Defective Colour Vision*, chapter 5, pages 39–50. Oxford University Press, 2003.
- D. Brainard and W. Freeman. Bayesian color constancy. *Journal of the Optical Society of America*, 14(7):1393–1411, 1997.
- T. Bridgeman. Inversion of the Munsell value equation. *Journal of the Optical Society of America*, (53):499–500, 1963.
- M. Brill. Do Tristimulus Values Have Units? *Color Research and Application*, 21(4): 310–313, 1996.
- M. Brill and A. Robertson. Open Problems on the Validity of Grassmann's Laws. In J. Schanda, editor, *Colorimetry. Understanding the CIE system*, chapter 10, pages 245–260. John Wiley & Sons, 2007.
- A. Brimicombe. *GIS, Environmental Modeling and Engineering*. CRC Press, 2009.
- A. Broadbent. A critical review of the development of the CIE1931 RGB color-matching functions. *Color Research and Application*, 29(4):267–272, 2004.
- G. Buntley and F. Westin. A comparative study of developmental color in a Chesnut-Chernozem-Brunizem soil climosequence. *Soil Science Society of America Proceedings*, (29):579–582, 1965.
- P. Burrough and R. McDonnell. *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, 1998.

- R. Burt, editor. *Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0.* USDA - Natural Resources Conservation Service, 2004.
- J. Caivano. *Sistemas de orden del color.* Universidad de Buenos Aires, 1995.
- J. Caivano and M. Buera, editors. *Color in food. Technological and psychophysical aspects.* CRC Press, 2012.
- N. Carlson. *Physiology of behavior.* Pearson Education, 2013.
- P. Centore. An open-source inversion algorithm for the Munsell renotation. *Color Research and Application*, 37(6):455–464, 2012a.
- P. Centore. Geometric Invariants Under Illuminant Transformations. *Color Research and Application*, page <http://dx.doi.org/10.1002/col.21769>, 2012b.
- F. Chen, D. Kissel, L. West, and W. Adkins. Field-Scale Mapping of Surface Soil Organic Carbon Using Remotely Sensed Imagery. *Soil Science of America Journal*, (64):746–753, 2000.
- V. Cheung, S. Westland, C. Li, J. Hardeberg, and D. Connah. Characterization of trichromatic color cameras by using a new multispectral imaging technique. *Journal of the Optical Society of America*, 22(7):1231–1240, 2005.
- C.-C. Chiao, T. Cronin, and N. Marshall. Eye design and color signaling in a stomatopod crustacean *Gonodactylus smithii*. *Brain, Behavior and Evolution*, (56):107–122, 2000.
- CIE. *History of the CIE 1913-1988.* Commission Internationale de l'Éclairage, 1999.
- CIE. *Colorimetry.* Commission Internationale de l'Éclairage, 2004.
- CIE. *Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour Space.* Commission Internationale de l'Éclairage, 2007.
- CIE. *International Lighting Vocabulary. CIE 17.4.* Commission Internationale de l'Éclairage, 2009.
- D. Cohen. On holy wars and a plea for peace. *Computer*, 14(10):48–54, 1981.
- M. Cook. Soil color. In *Encyclopedia of Soil Science*, pages 641–643. Springer, 2008.
- S. Coupland. Electrodes for Visual Testing. In *Principles and practice of clinical electrophysiology of vision*, chapter 17, pages 245–254. MIT Press, 2006.
- S. Cox, P. Daisey, R. Lake, C. Portele, and A. Whiteside, editors. *OpenGIS Geography Markup Language (GML). Implementation Specification.* Open Geospatial Consortium, 2004.
- CSG. *Normas cartográficas para la ejecución del MTN.* Consejo Superior Geográfico, 1985.

- C. Curcio, K. Sloan, and R. Kalina. Human Photoreceptor Topography. *Journal of Comparative Neurology*, (292):497–523, 1990.
- R. D'Andrade and A. Romney. A quantitative model for transforming reflectance spectra into the Munsell color space using cone sensitivity functions and opponent process weights. *PNAS*, 100(10):6281–6286, 2003.
- Datacolor. Match AFX Color formulation software, 2007.
- S. Deeb and A. Motulsky. Red-green color vision defects. *GeneReviews*, page <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK1301/>, 2005.
- D. DePriest. *A GPS user manual: working with garmin receivers*. Bloomington, 2003.
- J. Diamond. The worst mistake in the history of the human race. *Discover*, 8(5):64–66, 1987.
- EC. *European Interoperability Framework (EIF) for European public services*. European Commission, 2012.
- EEA. Map Colour Guide. In *Corporate Identity Manual*. European Environmental Agency, 2008.
- R. Escadafal. Remote sensing of arid soil surface color with Landsat Thematic Mapper. *Advances in Space research*, 9(1):1159–1163, 1989.
- R. Escadafal and A. Huete. Soil optical properties and environmental applications of remote sensing. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, (29): 709–715, 1992.
- R. Escadafal, M.-C. Girard, and D. Courault. Modeling the relationships between Munsell soil color and soil spectral properties. *International Agrophysics*, 4(3):249–261, 1988.
- ESRI. *ESRI Shapefile technical description*. Environmental Systems Research Institute, 1998.
- EU. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). *Official Journal of the European Union*, (108):1–14, 2007.
- M. Fairchild. *Color Appearance Models*. John Wiley & Sons, 2005.
- H. Fairman, M. Brill, and H. Hemmerdinger. How the CIE 1931 Color-Matching functions were derived from Wright-Guild data. *Color Research and Application*, 22(1): 11–23, 1997.
- FAO. *World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

- R. Ferraro and M. Aktihanoglu. *Location aware applications*. Manning, 2011.
- P. Finke, R. Hartwich, R. Dudal, J. Ibáñez, M. Jamagne, D. King, L. Montanarella, and N. Yassoglou. *Georeferenced soil database for Europe. Manual of procedures. Version 1.1*. European Communities, 2001.
- D. Foster. Color constancy. *Vision Research*, (51):674–700, 2011.
- E. Foster-Johnson. *Graphical applications with Tcl and Tk*. M & T Books, 1997.
- A. Fox. GLP Regulations vs. ISO 17025 Requirements: How do they differ? *Accreditation and Quality Assurance*, (8):303, 2003.
- V. Gaede and O. Günther. Multidimensional access methods. *ACM Computing Surveys*, 30(2):170–231, 1998.
- J. Gage. *Color y cultura : la práctica y el significado del color de la Antigüedad a la abstracción*. Ediciones Siruela, 1997.
- V. Gandhi, J. Kang, and S. Shekhar. Spatial Databases. In *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, chapter S, pages 1–22. John Wiley & Sons, 2008.
- G. Gartner and K. Rehr, editors. *Location Based Services and TeleCartography II. From Sensor Fusion to Context Model*. Springer, 2009.
- W. Gertal and G. Hall. Relating Soil Color to Soil Water Table Levels. *Ohio Journal of Science*, 90(4):118–124, 1990.
- M. Goodchild. Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, 1:3–20, 2010.
- D. Green and T. Bossomaier. *Online GIS and spatial metadata*. Taylor & Francis, 2002.
- R. Griggs. *Psychology. A concise introduction*. Worth Publishers, 2012.
- S. Grundwald, editor. *Environmental soil-landscape modeling. Geographic information technologies and pedometrics*. CRC Press, 2006.
- M. Guirao. *Los sentidos, bases de la percepción*. Alhambra Universidad, 1980.
- H. Gunal, S. Ersahin, B. Yetgin, and T. Kutlu. Use of chromameter-measured color parameters in estimating color-related soil variables. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39:726–740, 2008.
- R. Güting. An introduction to spatial databases. *VLDB Journal*, 3(4):357–399, 1994.
- N. Hadjikhani and R. Tootell. Projection of Rods and Cones Within Human Visual Cortex. *Human Brain Mapping*, 9:55–63, 2000.
- R. Harold. An introduction to appearance analysis. *Second sight*, (84):1–7, 2001.

- M. Harris. *Antropología cultural*. Alianza Editorial, 1983.
- J. Hernández-Andrés, R. Lee, and J. Romero. Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities. *Applied Optics*, 38(27): 5703–5709, 1999.
- D. Hillel. Human Culture and Soils. In *Encyclopedia of Soils*. Taylor & Francis, 2006.
- C. Hogg and S. Nusinowitz. Data Acquisition Systems for Electrodiagnostic Testing. In *Principles and practice of clinical electrophysiology of vision*, chapter 16, pages 237–244. MIT Press, 2006.
- D. Hubel. *Eye, Brain, and Vision*. W.H. Freeman, 1995.
- D. Hubel and T. Wiesel. *Brain and visual perception. The story of a 25-year collaboration*. Oxford University Press, 2005.
- R. Hunt. The Specification of Colour Appearance: I. Concepts and Terms. *Color Research and Application*, 2(2):55–68, 1977.
- R. Hunter and R. Harold. *The Measurement of Appearance*. John Wiley & Sons, 1987.
- Hunterlab. Averaging and Color Measurement. *Hunterlab Applications Notes*, 19(11): 1–3, 2008.
- S. Ibáñez, A. Marqués, H. Moreno, y M. Aguilar. Determinación del color del suelo mediante un sistema de aprendizaje automático (Pattern Recognition) como herramienta de caracterización edáfica. Informe Técnico, GVPRE/2008/186, 2009.
- INSPIRE. *D2.8.III.3 Data Specification on SOIL. Draft Guidelines*. INSPIRE Thematic Working Group SOIL, 2012.
- ISO. *ISO Standard 5087:1985. Information processing. Documentation symbols and conventions for data, program and systems flowcharts, program network charts and systems resources charts*. International Organization for Standardization, 1985.
- G. Jacobs. Evolution of colour vision in mammals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364:2957–2967, 2009.
- H. Jenny. *Factors of Soil formation. A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications, 1941.
- G. Jin, Z. Zhu, and X. Yu. Transformation from tristimulus RGB to Munsell notation HVC in a colored computer vision system. In *Proceedings SPIE 1569. Stochastic and Neural Methods in Signal Processing, Image Processing, and Computer Vision*, pages 507–511. SPIE, 1991.
- J. Jonas, U. Schneider, and G. Naumann. Count and density of human retinal photoreceptors. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 230:505–510, 1992.

- D. Judd. Reduction of data on mixture of color stimuli. *Bureau of Standards Journal of Research*, 4(4):515–548, 1930.
- D. Judd and D. Nickerson. One Set of Munsell Re-notations. Technical report, National Bureau of Standards, 1967.
- D. Junkins and S. Farley. *NTv2 National Transformation Version 2. Developer's Guide*. Geodetic Survey Division. Geomatics Canada, 1995.
- W. Kahle. *Color atlas and textbook of human anatomy. Volume 3: Nervous system and sensory organs*. George Thieme Verlag, 1986.
- J. Kalat. *Biological Psychology*. Wadsworth, 2009.
- B. Kernighan and D. Ritchie. *The C programming Language*. Prentice Hall, 1988.
- M. Kinoshita, N. Shimada, and K. Arikawa. Colour vision of the foraging swallowtail butterfly *Papilio xuthus*. *The Journal of Experimental Biology*, (202):95–102, 1999.
- S. Kleinlogel and A. White. The Secret World of Shrimps: Polarisation Vision at Its Best. *PLoS ONE*, 3(5):e2190.doi:10.1371/journal.pone.0002190, 2008.
- Konica Minolta. *Chroma Meter CS-100A. Instruction manual*. Konica Minolta, 1992.
- Konica Minolta. *Colibri essentials*, 2010.
- R. Kuehni. *Color Space and its Divisions*. John Wiley & Sons, 2003.
- H. Laamanen, T. Jääskeläinen, and J. Parkkinen. Conversion between the reflectance spectra and the Munsell notations. *Color Research and Application*, 31(1):57–66, 2006.
- R. Lake. The application of geography markup language (GML) to the geological sciences. *Computers & Geosciences*, (31):1081–1094, 2005.
- R. Lake and C. Reed. *GML Point Profile*. Open Geospatial Consortium, Inc., 2005.
- E. Landa and M. Fairchild. Charting color from the eye of the beholder. *American Scientist*, 93:436–443, 2005.
- H. Lang. How much physics does colorimetry really need? *Color Research and Application*, 22(3):212–215, 1998.
- H.-C. Lee. *Introduction to Color Imaging Science*. Cambridge University Press, 2005.
- N. Levin, E. Ben-Dor, and A. Singer. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24):5475–5492, 2005.
- K. Li, P. Tiruveedhula, and A. Roorda. Intersubject variability of foveal cone photoreceptor density in relation to eye length. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(12):6858–6867, 2010.

- P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire, and D. Rhind. *Geographical Information Systems and Science*. John Wiley & Sons, 2005.
- D. MacAdam. Projective Transformations of I.C.I. Color Specifications. *Journal of the Optical Society of America*, 27:294–299, 1937.
- D. MacAdam. Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight. *Journal of the Optical Society of America*, 32(5):247–274, 1942.
- F. Mahyar, V. Cheung, and S. Westland. Different transformation methods between CIELAB coordinates and Munsell hue. *Coloration Technology*, (126):31–36, 2010.
- D. Malacara. *Color Vision and Colorimetry. Theory and applications*. SPIE Press, 2002.
- N. Mamoulis. *Spatial Data Management*. Morgan & Claypool, 2012.
- Y. Manolopoulos, A. Papadopoulos, and M. Vassilakopoulos, editors. *Spatial Databases: Technologies, Techniques and Trends*. 2005.
- B. Marchal. *XML by example*. Que, 2000.
- A. Marqués, J. Gisbert, S. Ibáñez, and H. Moreno. Procedures and tools for loading soil data in Geographic Information Systems. In *Proceedings of the 5th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Earth Information and Systems*, volume I, pages 159–161. Institut Cartogràfic de Catalunya, 2006.
- A. Marqués, S. Ibáñez, H. Moreno, y J. Gisbert. Determinación del color del suelo mediante un sistema de aprendizaje automático. En *IX Congreso Nacional del Color*, páginas 65–68. Universidad de Alicante, 2010.
- A. Marqués Mateu, J. Berné Valero, y J. Gisbert Blanquer. Transformaciones de datum en el contexto de un Sistema de Información Geográfica. En *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas*, páginas 959–975. Universidad de Granada, 2006.
- A. Marqués-Mateu, S. Ibáñez, H. Moreno, J. Gisbert, S. Balasch, and M. Aguilar. Statistical relationships between soil color and some factors of soil formation. In *Color in Food. Technological and Psychophysical Aspects*, chapter 36, pages 345–354. CRC Press, 2012.
- A. Marqués-Mateu, J. Lerma, and G. Riutort-Mayol. Statistical grey level and noise evaluation of Foveon X3 and CFA image sensors. *Optics & Laser Technology*, (48): 1–15, 2013.
- F. Martín Asín. *Geodesia y Cartografía Matemática*. Paraninfo, 1990.
- F. Martínez Verdú. *Diseño de un Colorímetro Triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.

- F. Martínez-Verdú, V. Arnau, J. Malo, A. Felipe, and J. Artigas. A new chromatic encoding for machine vision invariant to the change of illuminant. *Journal of Optics*, 27(4): 171–181, 1996.
- R. Mathieu, M. Pouget, B. Cervelle, and R. Escadafal. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typical soil color of an arid environment. *Remote Sensing of the Environment*, (66):17–28, 1998.
- M. Melgosa, M. Rivas, E. Hita, and F. Vienot. Are We Able to Distinguish Color Attributes? *Color Research and Application*, (25):356–367, 2000.
- M. Millodot. *Dictionary of Optometry and Visual Science*. Butterworth-Heinemann, 2009.
- Minolta. *Chroma meter CS-100A. Communication manual*. Minolta Co. Radiometric instruments operations, 1992.
- P. Moon and D. Spencer. A metric for color space. *Journal of the Optical Society of America*, 33(5):260–269, 1943.
- Mosby. *Mosby's Medical Dictionary. 9th Edition*. Elsevier, 2012.
- Munsell Color. *Munsell Soil color charts*. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation, 1994.
- F. Netter, J. Craig, J. Perkins, J. Hansen, and B. Koeppen. *Atlas of Neuroanatomy and Neurophysiology. Selections from the Netter Collection of Medical Illustrations*. Icon Custom Communications, 2002.
- S. Newhall, D. Nickerson, and D. Judd. Final Report of the O.S.A. Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors. *Journal of the Optical Society of America*, 33(7): 385–418, 1943.
- E. Newman and P. Hartline. Integration of visual and infrared information in bimodal neurons of the rattlesnake optic tectum. *Science*, (213):789–791, 1981.
- D. Nickerson. History of the Munsell color system, company, and foundation, I. *Color Research and Application*, 1:7–10, 1976.
- J. Noguera-Iso, F. Zarazaga-Soria, and P. Muro-Medrano. *Geographic Information Metadata for Spatial Data Infrastructures. Resources, Interoperability and Information Retrieval*. Springer, 2005.
- OGC. *OpenGIS Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 2: SQL option*. Open Geospatial Consortium, 2007.
- OGC. *OpenGIS Implementation Standard for Geographic Information - Simple feature access - Part 1: Common architecture*. Open Geospatial Consortium, 2010.

- Y. Ohno. CIE fundamentals for color measurements. In *IS&T's NIP16: International Conference on Digital Printing Technologies*, pages 540–545, 2000.
- N. Ohta and A. Robertson. *Colorimetry. Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- M. Oliver, editor. *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer, 2010.
- OSRAM. *BIOLUX T8. Product family datasheet*. OSRAM, 2013.
- F. Ovalles-Viani. El color del suelo: definiciones e interpretación. *CENIAP*, (3): <http://www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm>, 2003.
- M. Pointer. Measuring Colour Rendering - A New Approach II. Technical Report DQL-OR 007, National Physics Laboratory, 2004.
- C. Poynton. *Digital Video and HDTV: Algorithms and Interfaces*. Morgan Kaufmann, 2003.
- J. Qi, A. Chehbouni, A. Huete, Y. Kerr, and S. Sorooshian. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of the Environment*, (48):119–126, 1994.
- S. Ranamukhaarachi and K. Wickramarachchi. Color preference and sticky traps for field management of thrips *Ceratohripoides claratris* (Shumsher) (Thysanoptera: Thripidae) in tomato in central Thailand. *International Journal of Agriculture & Biology*, 9(6): 839–844, 2007.
- P. Rigaux, M. Scholl, and A. Voisard. *Spatial Databases with application to GIS*. Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- B. Rigg. Colorimetry and the CIE system. In *Color Physics for Industry*, pages 81–120. Society of Dyers and Colourists, 1997.
- G. Riutort-Mayol, A. Marqués-Mateu, A. Seguí, and J. Lerma. Grey Level and Noise Evaluation of a Foveon X3 Image Sensor: A Statistical and Experimental Approach. *Sensors*, (12):10339–10368, 2012.
- A. Rodríguez Pascual. Proposición de una definición profunda de SIG. En *Actas del 2º Congreso AESIG*, páginas 127–142. AESIG, 1993.
- L. Rosenfeld. Clinical Chemistry Since 1800: Growth and Development. *Clinical Chemistry*, 48(1):186–197, 2002.
- J. Rossignoli Just, A. Dalda Mourón, and F. Boyero Delgado. *Proyección Universal transversa Mercator. Volumen I*. Servicio Geográfico del Ejército, 1976.
- L. Russo, R. Stehouwer, J. Heberling, and K. Shea. The composite insect trap: An innovative combination trap for biologically diverse sampling. *PLoS ONE*, 6(6): e21079.doi:10.1371/journal.pone.0021079, 2011.

- O. Sacks. *La isla de los ciegos al color*. Anagrama, 1999.
- H. Samet. *Applications of Spatial Data Structures: Computer Graphics, Image Processing and GIS*. Addison-Wesley, 1989.
- M. Sánchez-Marañón, R. Ortega, I. Miralles, and M. Soriano. Estimating the mass wetness of Spanish arid soils from lightness measurements. *Geoderma*, (141):397–406, 2007.
- M. Sánchez-Marañón, P. García, R. Huertas, J. Hernández-Andrés, and M. Melgosa. Influence of Natural Daylight on Soil Color Description: Assessment Using a Color-Appearance Model. *Soil Science Society of America Journal*, (75):984–993, 2011.
- B. Saunders. Revisiting basic color terms. *Journal of the Royal Anthropological Institute*, 6:81–99, 2000.
- R. Schaetzl and S. Anderson. *Soil genesis and geomorphology*. Cambridge University Press, 2005.
- J. Schanda. *Colorimetry. Understanding the CIE system*. John Wiley & Sons, 2007.
- G. Seeber. *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, 2003.
- M. Sen and T. Duffy. GeoSciML: Development of a generic GeoScience Markup Language. *Computers and Geosciences*, (31):1095–1103, 2005.
- A. Sichert, P. Friedel, and J. van Hemmen. Modelling imaging performance of snake infrared sense. In *Proceedings of the 13th Congress of the Societas Europaea Herpetologica*, pages 219–223. Societas Europaea Herpetologica, 2006.
- R. Simonson. Soil color standards and terms for field use - History of their development. In *Soil Color*, pages 1–20. Soil Science Society of America, 1993.
- Society for Neuroscience. Sensation and Perception. pages 15–21. 2008.
- Soil Survey Division Staff. *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service. USDA. Handbook 18, 1993.
- Soil Survey Staff. *Claves para la Taxonomía de Suelos*. USDA - Natural Resources Conservation Service, 2010a.
- Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy 11th Edition*. USDA - Natural Resources Conservation Service, 2010b.
- Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy 11th Edition*. United States Department of Agriculture, 2010c.
- J. Spaethe, J. Tautz, and L. Chittka. Do honeybees detect colour targets using serial or parallel visual search? *The Journal of Experimental Biology*, (209):987–993, 2006.

- M. Steinbach and P.-N. Tan. kNN: k-Nearest Neighbors. In *The Top 10 algorithms in data mining*, chapter 8, pages 151–162. CRC press, 2009.
- Subgrupo de Trabajo de Metadatos. *Núcleo Español de Metadatos (NEM v1.1)*. Consejo Superior Geográfico, 2010.
- D.-W. Sun, editor. *Computer vision technology for food quality evaluation*. Elsevier, 2008.
- R. Thwaites. Color. In *Encyclopedia of Soil Science*, pages 303–306. Taylor & Francis, 2006.
- J. Torrent and V. Barrón. Laboratory measurement of soil color: theory and practice. In *Soil Color*, pages 21–34. Soil Science Society of America, 1993.
- G. van Rossum and F. Drake, editors. *The Python Language Reference. Release 2.7.3*. Python Software Foundation, 2013.
- R. Viscarra Rossel, B. Minasny, P. Roudier, and A. McBratney. Colour space models for soil science. *Geoderma*, 133:320–337, 2006.
- R. Viscarra Rossel, Y. Fouad, and C. Walter. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering*, (100):149–159, 2008.
- R. Viscarra Rossel, A. McBratney, and B. Minasny, editors. *Proximal Soil Sensing*. Springer, 2010.
- P. Vretanos, editor. *GML simple features profile*. Open Geospatial Consortium, Inc., 2005.
- D. Warner. The Duboscq Colorimeter. *Bulletin of the Scientific Instrument Society*, (88): 68–70, 2006.
- R. Webster and M. Oliver. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons, 2007.
- S. Westland and C. Ripamonti. *Computational Colour Science using MATLAB*. John Wiley & Sons, 2004.
- C. Williams and D. Yaalon. An experimental investigation of reddening in dune sand. *Geoderma*, 17(3):181–191, 1977.
- V. Winiwarter. Environmental history of soils. In *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. UNESCO, Eolss Publishers, 2010.
- S. Witkowski and C. Brown. Lexical universals. *Annual Review of Anthropology*, 7: 427–451, 1978.
- M. Worboys and M. Duckham. *GIS. A computing perspective*. CRC Press, 2004.

- D. Wright, M. Goodchild, and J. Proctor. GIS: Tool or science? Demystifying the persistent ambiguity of GIS as "Tool" Versus "Science". *The Annals of the Association of American Geographers*, 87(2):346–362, 1997.
- W. Wright and F. Pitt. Hue-discrimination in normal colour-vision. *Proceedings of the Physical Society*, 46(3):459–473, 1934.
- A. Wundheiler. On the metric of color space. *Journal of the Optical Society of America*, 36(5):288–291, 1946.
- W. Wyszecki and W. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. John Wiley & Sons, 1982.
- J. Xin, H.-L. Shen, and C. Lam. Investigation of Texture Effect on Visual Colour Difference Evaluation. *Color Research and Application*, 30(5):341–347, 2005.
- A. Young. What color is it? Technical Report NASA-CR-182600, NASA, 1988.

Apéndice A

Programación

A.1 Programa CS100A

El programa CS-100A es la piedra angular del procedimiento descrito en esta tesis. En la Figura 4.10 está el interfaz gráfico de usuario del programa. Este interfaz es muy simple y de hecho todos los requerimientos del usuario se encuentran en él. Este programa se escribió en dos lenguajes de programación, algunas partes se han desarrollado en lenguaje TCL (Foster-Johnson, 1997) y otras partes en Python (van Rossum and Drake, 2013). A continuación se describe el funcionamiento del mismo. La tabla A.1 contiene una breve descripción de la tarea que realiza cada orden.

La primera tarea que debe realizar el usuario es conectar el cable de comunicación entre el ordenador y el colorímetro. Al arrancar el colorímetro hay que asegurar que dicho arranque se realiza en modo comunicación y no en modo manual. A continuación se ejecuta el programa y aparece el interfaz gráfico. La primera acción dentro del programa es la configuración del sistema. La configuración es muy simple y consta de dos parámetros: el puerto de comunicaciones y el nombre del fichero de datos que se registrará a lo largo de la sesión. El sistema asigna dos valores por defecto tanto para el puerto de comunicaciones como para el fichero de datos. La configuración se lleva cabo pulsando el botón “Config”.

A continuación el usuario ya puede comenzar a realizar las medidas de color pulsando el botón “Measure”. El programa permite realizar series de medidas a la misma muestra. En ese caso, los valores de la serie se van visualizando en la ventana de texto principal

Tabla A.1: Botones del programa CS-100A

Botón	Descripción
Measure	Realiza la medida de una muestra
Clear	Limpia los valores de la ventana de texto
Save	Registra la medida actual en el fichero de datos
Export	Almacena los datos en un formato de datos espacial
Config	Asigna puerto de comunicaciones y nombre de fichero de datos
About	Presenta por pantalla la versión del programa
Exit	Finaliza la ejecución del programa

situada a la izquierda de la zona de botones (Figura 4.10). Los valores medios de la serie de medidas se visualizan en la mini ventana de texto situada en la parte inferior y se actualizan en cada nueva medida.

Una vez realizada la serie de medidas, el usuario asignará un identificador a la muestra rellenando la casilla correspondiente. En ese momento el sistema está a punto para registrar las medidas al fichero de datos. La grabación se realiza pulsando el botón “Save”. En el momento en que los datos son registrados en el fichero, las ventanas de texto se limpian y el sistema queda listo para una nueva serie de medidas. Los datos registrados en el fichero de datos serán los valores medios de cada serie de mediciones. Aparte de los datos grabados con el botón “Save”, el sistema mantiene un fichero de registro continuo o fichero *log* que permite al usuario inspeccionar toda la sesión instrucción a instrucción en caso necesario. Si el usuario comete algún error en el transcurso de la serie de lecturas debe pulsar el botón “Clear” para limpiar los datos y comenzar de nuevo una serie de medidas.

El botón “Export” se ha dejado para la parte final porque es el que realiza la tarea más importante de todo el proceso. Este botón almacena los datos de color de cada muestra de suelo junto con sus coordenadas en dos formatos de datos espaciales: GML y *Shapefile*. El proceso está representado en el diagrama de flujo de la Figura A.1.

En primer lugar el programa lee los datos almacenados en el fichero de datos que se especificó en la configuración inicial. Al leer los datos el sistema detecta si hay medidas de blancos de referencia. Esta detección se consigue asignando un valor reservado

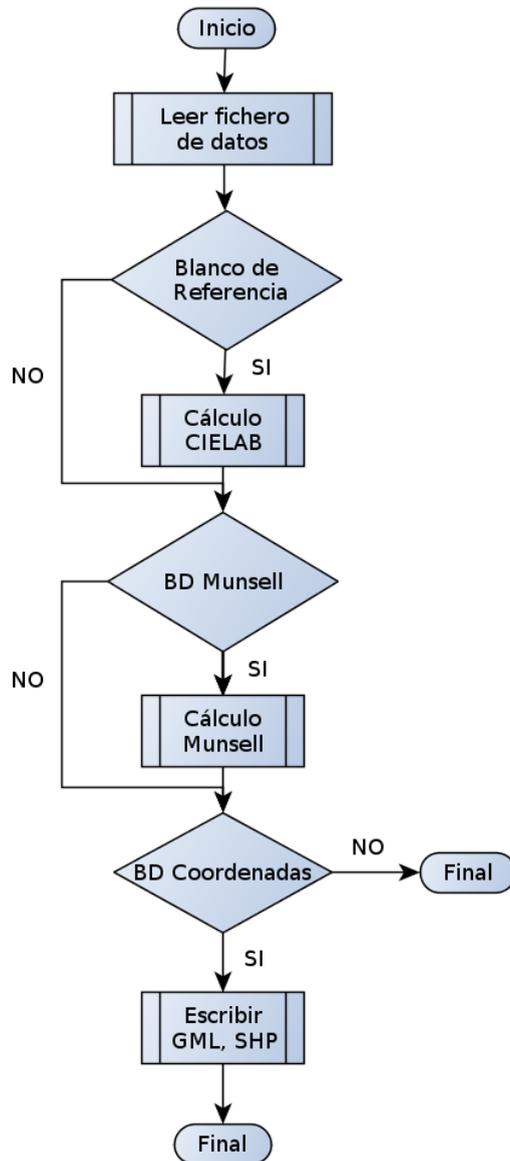


Figura A.1: Diagrama de flujo de la orden "Export" del programa CS-100A

al identificador de la muestra. Los valores **BLANCO**, **WHITE** y **W** están reservados para indicar medidas del blanco, es decir, cualquier muestra con alguno de estos identificadores será reconocida como blanco de referencia. Este detalle es muy importante y debe ser conocido por el usuario del programa.

Si el sistema detecta lecturas a blancos, automáticamente calculará las coordenadas CIELAB y los valores de tono (H) y croma (C) de todas la muestras registradas en el fichero de datos y las almacenará en memoria para su tratamiento posterior. Si no detecta lecturas a blancos el proceso seguirá en el paso siguiente.

En segundo lugar el programa busca una base de datos de entrenamiento para convertir las coordenadas de cada muestra en su notación Munsell correspondiente con el método kNN. La base de datos debe estar almacenada en un fichero llamado **munsell.db.csv** en formato CSV. Si el programa encuentra este fichero realizará la transformación de coordenadas Yxy a notaciones Munsell y las almacenará en memoria. En caso contrario continua la ejecución en el paso siguiente.

En tercer y último lugar el programa almacena la información procesada en los pasos previos en un formato de datos espacial. Para llevar a cabo esta última tarea es necesario leer un fichero que contiene la base de datos de coordenadas de las muestras. El nombre del fichero debe ser **coord.db.csv** y debe estar almacenado en formato CSV. Si este fichero no se encuentra el programa aborta y presenta un mensaje de error por pantalla. En caso contrario procede con la escritura de los datos. La escritura de datos está basada en la librería GDAL/OGR, de modo que si el programa no es capaz de encontrarla presentará un mensaje de error por pantalla y abortará. El usuario debe encargarse de instalar dicha librería.

La operación realizada para enlazar el color de cada muestra con sus coordenadas se conoce como enlace relacional (*relational join*) en la terminología de los sistemas de gestión de bases de datos. En esta operación es fundamental que los identificadores sean únicos y no contengan errores, puesto que es el identificador de la muestra el que se utiliza como clave para unir un color con unas coordenadas.

El Listado 3.1 del Capítulo 3 contiene los datos de un pequeño ejemplo realizado con

los datos de las Tablas A.2 y A.3. Se observa que el enlace de datos está basado en el campo clave que contiene el identificador de la muestra en ambas tablas (campo LAB_ID en la tabla de coordenadas y campo Sample_ID en la tabla de datos de color).

Tabla A.2: Ejemplo de tabla de coordenadas

LAB_ID	X_ UTM	Y_ UTM	CRS
6490	693768.30	4271467.03	ED50
6509	691327.39	4269570.08	ED50

Tabla A.3: Ejemplo de tabla de datos de color

Sample_ID	Luminance	x	y
6490	59.69	0.3705	0.3841
6509	37.31	0.3854	0.3906

A.2 Programa **snn**

El programa **snn** (*soil nearest neighbours*) se escribió para obtener notaciones Munsell a partir de coordenadas CIE (CIE Yxy o CIELAB) con el método kNN. Este programa se desarrolló independientemente del programa CS-100A. El programa está escrito en lenguaje C estándar (Kernighan and Ritchie, 1988), lo cual permite ejecutarlo en distintas plataformas sin realizar ningún cambio en el código.

La compilación en un sistema Linux se realiza con la siguiente orden:

```
$ gcc snn.c -o snn -lm
```

donde se indica que el nombre del ejecutable será **snn** y que en el proceso de enlace se incluirá la biblioteca matemática del lenguaje C.

Un ejemplo típico de uso del programa **snn** es la siguiente orden:

```
$ snn munsell_db.csv general.csv -csv -hvc
```

Esta orden se utilizó para asignar etiqueta Munsell a un conjunto de muestras contenidas en el fichero **general.csv** que contenía datos de color de suelos de la provincia de

Valencia y Alicante. En este caso, la base de datos de entrenamiento `munsell.db.csv` contiene los valores registrados por el colorímetro al observar las fichas de color de la tabla Munsell.

La lista completa de opciones del programa es la siguiente:

- v: presenta mensajes informativos por pantalla
- [-w0 | w1 | w2]: asigna distintos pesos a la luminancia
- csv: escribe la salida en formato CSV
- hvc: añade a la salida los valores numéricos de tono, valor y croma
- n **number**: especifica el número de vecinos para realizar la clasificación

El programa contiene dos opciones que permiten experimentar con los datos observados. La opción [-w0 | w1 | w2] permite asignar distintos pesos a la luminancia. El interés de esta opción fue probar diferentes pesos aplicados a la variable luminancia puesto que conceptualmente es muy distinta a las otras dos componentes cromáticas. Las pruebas mostraron que los resultados eran idénticos aplicando cualquiera de las ponderaciones (Ibáñez et al., 2009; Marqués et al., 2010).

La segunda opción es -n **number** con la cual se puede especificar el número de vecinos utilizado en la clasificación. En el caso de la orden anterior, donde no se especifica la opción -n, se toma por defecto un número de vecinos igual a uno. Esta es la opción adecuada en el caso de utilizar la tabla Munsell como base de datos de entrenamiento, puesto que cada clase Munsell está especificada una única vez.

El formato de los dos ficheros de entrada debe ser de texto con los campos separados por comas (CSV). La información de cada muestra se especifica en cuatro campos. En el caso de las muestras de entrenamiento el formato es: **L, x, y, CLASS**, donde **L** es la componente acromática (**L*** en el sistema CIELAB o **Y** en el sistema Yxy) y las coordenadas **xy** contienen la información cromática (coordenadas **a*b*** en el sistema CIELAB o coordenadas de cromaticidad **xy** en el sistema Yxy). La cadena de caracteres **CLASS** representa el identificador de la clase o categoría a la que pertenece la muestra, que en el caso del problema de conversión CIE → Munsell es la propia notación Munsell.

El fichero de datos de las muestras que van a ser clasificadas también debe estar almacenado en formato CSV y su estructura debe ser: **L, x, y, ID**. La estructura de campos es similar a la estructura de campos de las muestras de entrenamiento, pero en este caso la cadena de caracteres **ID** representa el identificador de la muestra de suelo. Este identificador debe ser único en toda la base de datos puesto que como se comentó anteriormente se utiliza en otras etapas del tratamiento de datos para enlazar datos de posición geográfica de la muestra.

El usuario debe asegurar que los sistemas de coordenadas cromáticas de la base de datos de entrenamiento y de las muestras sean coincidentes. En otras palabras, si las coordenadas de las muestras están representadas en el espacio Yxy que proporciona el colorímetro, la base de datos de entrenamiento debe contener los patrones expresados en ese mismo espacio.

La ejecución del programa **snn** (escrito en C) desde el programa **CS100A** (escrito en TCL y Python) se realiza mediante una llamada al sistema. Una de las mejoras en una futura versión será integrar la conversión de coordenadas a notaciones Munsell en el propio código del programa CS-100A.

A.3 Formatos de datos espaciales

Este apéndice sobre programación concluye con algunos detalles de la escritura de los ficheros de datos espaciales. Se especifican los pasos necesarios para escribir datos espaciales con la biblioteca de funciones GDAL/OGR desde un programa en lenguaje Python. Esta biblioteca no es la única opción existente para escribir datos espaciales, sin embargo proporciona un entorno muy cómodo para escribir en los dos formatos, *GML* y *Shapefile*, con cambios mínimos en el código. A continuación se detalla la secuencia para escribir los ficheros.

En primer lugar se debe cargar la biblioteca OSGEO:

```
from osgeo import ogr
from osgeo import osr
```

A continuación se debe crear un objeto denominado controlador (*driver*) que especifica el formato de salida final de los datos. Esta línea será diferente en el caso del formato GML o *Shapefile* para crear el controlador adecuado. En el caso del formato GML el driver es '**GML**' y en el caso del formato *Shapefile* es '**ESRI Shapefile**', el resto del código es idéntico. En el caso del GML la línea será:

```
ogr_driver = ogr.GetDriverByName('GML')
```

A continuación se crea un objeto (*Layer*) para gestionar los datos:

```
out_sr = osr.SpatialReference()
out_sr.ImportFromEPSG(23030)

ogr_datasource = ogr_driver.CreateDataSource(geoname)
ogr_layer = ogr_datasource.CreateLayer(geoname,
                                       srs=out_sr, geom_type=ogr.wkbPoint)
```

La variable **geoname** es una cadena de caracteres que contiene el nombre de fichero donde se almacenarán los datos. El tipo de elemento geométrico se especifica con la expresión **geom_type=ogr.wkbPoint**. El siguiente paso consiste en añadir los campos que contendrán los atributos. Un campo de tipo real (*float*) se asigna con el siguiente bloque:

```
f = ogr.FieldDefn()
f.SetName(fname)
f.SetType(ogr.OFTReal)
f.SetWidth(10)
f.SetPrecision(5)
ogr_layer.CreateField(f)
```

La variable **fname** es una cadena de caracteres que contiene el nombre del campo. El bloque anterior se repetirá tantas veces como campos existan en la tabla de atributos. El siguiente paso consiste en crear un objeto (*Feature*) que permitirá añadir los datos físicamente:

```
ogr_feature = ogr.Feature(ogr_layer.GetLayerDefn())
```

A continuación se ejecutará un bucle con una iteración por cada registro. En cada iteración se añadirá en primer lugar la geometría y después los atributos.

```
wkt = "POINT (" + str(X) + " " + str(Y) + ") "  
pnt = ogr.CreateGeometryFromWkt(wkt)  
ogr_feature.SetGeometryDirectly(pnt)
```

La variable `wkt` es una cadena de caracteres que almacena las coordenadas del punto según el estándar OGC de texto. Las variables `X` e `Y` contienen los valores de las coordenadas del punto. A continuación se añaden los atributos:

```
ogr_feature.SetField(fname, fvalue)
```

La variable `fname` es una cadena de caracteres que contiene el nombre del campo y la variable `fvalue` contiene el valor que se almacenará en el campo. El tipo de datos de `fvalue` debe coincidir con el tipo de dato que se definió anteriormente al crear el campo. El último paso consiste en crear los ficheros en disco:

```
ogr_layer.CreateFeature(ogr_feature)
```

El resultado es una serie de ficheros que contienen el mapa de puntos en el formato especificado por el controlador.

Apéndice B

Aplicación

El procedimiento propuesto en esta tesis proporciona datos del color del suelo en forma de mapas de puntos con atributos de color asociados. El usuario dispone de un conjunto de datos que permite analizar la distribución espacial del color, así como relacionar el color con otras características del suelo.

En este apéndice presentamos una aplicación que no hemos encontrado en la bibliografía. Se trata de un estudio realizado en una zona agrícola de Sax (Alicante) cuyo objetivo era encontrar relaciones estadísticas entre el color del suelo y un conjunto de variables relacionadas con los factores formadores del suelo. El estudio se publicó como capítulo de un libro en la editorial CRC (Marqués-Mateu et al., 2012) y se reproduce a continuación con permiso de la editorial y en su paginación original.

Statistical Relationships between Soil Color and Some Factors of Soil Formation

ÁNGEL MARQUÉS-MATEU, SARA IBÁÑEZ, HÉCTOR MORENO,
JUAN M. GISBERT, SEBASTIÀ BALASCH, and MARIANO AGUILAR

Contents

36.1 Introduction	345
36.1.1 Study Area	346
36.2 Preparation and Processing of Data	348
36.3 Elements of Colorimetry	349
36.4 Results and Discussion	352
36.4.1 Lightness (L^*)	352
36.4.2 Hue (h_{ab}^*)	353
36.4.3 Chroma (C_{ab}^*)	353
Acknowledgment	354
References	354

36.1 Introduction

Soil is a key element in crop development and has always been a topic of great interest to humankind and its development. This interest is the foundation of soil science, which is the study of the formation, properties, ecology, and classification of soils.

The classical theory of soil science establishes the following equation of soil formation:

$$s = f(\text{cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t})$$

The formation factors are climate (cl), organisms (o), topography (r), parent material (p), and time (t). The outcome of the equation is what we know as

soil. It seems clear that the combined action of the previous factors results in very complex processes.

There is not a generally accepted definition for the term soil. Jenny (1941) provides a number of definitions given by different authors. In the context of agriculture and soil science, soil is the body where plants find foothold, nourishment, and other conditions of growth.

One of the most important features of soil is anisotropy which makes it different from other geological formations. The direction of maximum anisotropy is the vertical or z -axis, which allows for visual identification of different layers from texture, structure, color, and other characteristics. The detailed description of the different soil layers is known as a soil profile.

Color provides valuable information on the process of soil formation as well as on constituent elements and other properties. Soil color is the variable of interest in this study. We try to obtain significant statistical relationships between soil color and other agricultural variables which are related to formation factors in some way.

36.1.1 Study Area

The study area is located in the province of Alicante (southeastern Spain). The statistical analyses were performed on data from several agricultural fields belonging to the municipality of Sax (Figure 36.1). The total area of Sax is 6350 ha, and the geographical coordinates are $38^{\circ}34'$ N latitude and $0^{\circ}48'$ W



Figure 36.1 Location map.

longitude. The study area is relatively small in size; therefore, factors such as climate, parent material, or topography are well defined.

The climate is Mediterranean with clear continental features. Summers are dry and winters are cold. Rain is abundant in the equinoxes. The average annual rainfall is 305.5 mm, and the average annual temperature is 15.2°C.

The most prominent geomorphological features are the mountain ranges of Cabrerías, Peña Rubia, La Argueña, and Cámara which define two north–south oriented valleys (Figure 36.2). The elevation of the terrain ranges from 470 to 800 m above mean sea level.

The agricultural lands are located in the hillsides of the valleys, mainly in terraces. The principal crops are vineyards, olive trees, and almond trees, either under irrigation or not. Some fields are cultivated using conservation agriculture techniques, and the stoniness varies greatly. Natural vegetation is mainly composed of Aleppo pines (*Pinus halepensis* Mill.) and various species of Mediterranean bush.

Parent materials are Tertiary limestone and marls, and Triassic clay materials. Limestone above 600 m of elevation is subject to severe water erosion which greatly influences the processes of soil formation.

The variability of soil color is basically determined by the parent materials. There are red and brown soils, modified by different contents of calcium carbonate and organic matter, which produce lighter and darker colors, respectively.

The most common soil groups are Aridisols and Entisols (Soil Survey Staff 2010). There are also less evolved soils, called Orthents, in steep slopes above 600 m. These cannot be used for agriculture. Calcids, Argids, Cambids, and Salids, with calcic, argillic, cambic, and gypsic horizons, are found in areas of

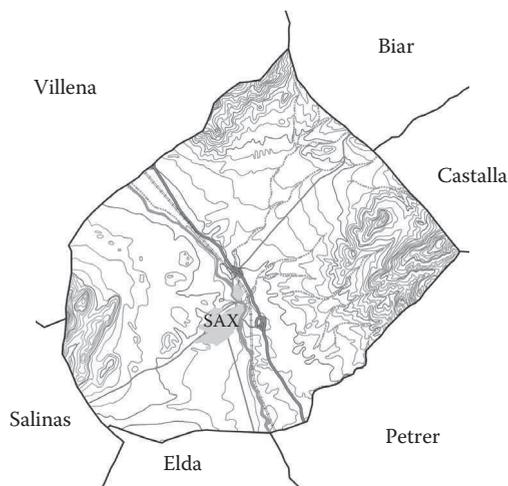


Figure 36.2 Topographic map.

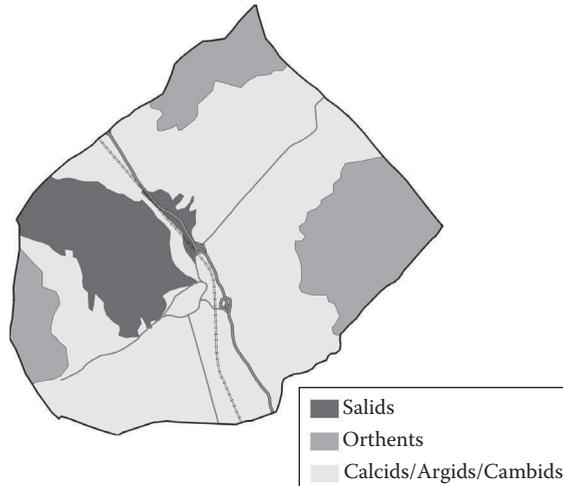


Figure 36.3 Soil map.

gentle slope with elevations between 450 and 600 m. Calcids are located in the foothill areas and support most of the unirrigated crops. Sometimes Calcids have crusts and calcium carbonate cementations. Salids form next to an outcrop of Keuper salts. Alluvial and colluvial soils are located near the banks of river Vinalopó. These young soils have excellent physical properties which make them suitable for agricultural purposes (Figure 36.3).

36.2 Preparation and Processing of Data

The data were gathered using a geographical information system (GIS). GIS can be defined as a system of hardware, software, and procedures designed to support the capture, management, manipulation, analysis, modeling, and display of spatially referenced data for solving complex planning and management problems (NCGIA 1990).

In a GIS context, there are two basic approaches to represent geographical data: the field and object models (Worboys and Duckham 2004). The field-based model treats geographical information as a collection of spatially distributed values. A typical example of field-based information is a pattern of terrain elevations. The object-based model represents the space by means of discrete elements with geographical reference. Basic objects are points, lines, and polygons.

The object model is usually associated with vector representation, whereas the field model is associated with raster representation (Burrough and McDonnell 1998). Both models were used in this study.

The data were obtained in two stages. The first stage consisted of field work carried out to locate and collect soil samples. It is very important to record

sample coordinates as accurate as possible in order to properly relate soil samples to other variables. It is also necessary to assign a unique identifier to each sample. The sample coordinates, together with their identifiers, form the sample point map.

The geographical locations of samples were collected with handheld GPS receivers. Other variables were obtained from existing maps. The two data sets, i.e., the sample points and the maps, have different coordinate systems and must be transformed into a common reference system. The goal of this transformation is to line up the different data sets.

Once the spatial data sets are stored in the same coordinate system, samples can be overlaid on existing maps or images to capture spatially distributed variables directly from digital maps (Figure 36.4). Spatially distributed variables include elevation, slope, aspect, and parent material, among others.

The second stage of data collection consisted of laboratory measurements. A number of variables, including soil color, were measured in the laboratory from soil samples. The numerical values of these variables were arranged in tables, which were subsequently linked to the point map using the relational join operator.

The resulting data set can be divided into four groups of variables:

1. Geomorphological variables. The values of elevation above sea level, slope, and aspect were collected from the digital terrain model of the study area.
2. Edaphic variables. This group includes carbonate content, pH, electrical conductivity, texture, and stoniness. Their values were obtained by using specific laboratory procedures except in the case of stoniness, whose values were obtained by direct photographic interpretation.
3. Management variables. These variables include crop and irrigation system and were collected during field visits.
4. Color variables. Chromaticity coordinates were collected using a colorimeter under standard conditions. We used illuminant D65 as the light source and 45/0 geometry. The measurements were performed with a field of view of 2°.

This data set is suitable for statistical processing. There are different statistical techniques available to process multivariate data (McGarigal et al. 2000). In this study, we used the method of stepwise regression. This method is suitable in situations with collinearity between independent variables, which is common in data sets that do not come from experimental design.

36.3 Elements of Colorimetry

In the context of soil science, color is one of the basic properties reported in soil profile descriptions (Bigham and Ciolkosz 1993). The common approach



Figure 36.4 Point map overlaid onto an aerial photograph.

to communicating soil color is based on the use of specific Munsell charts under natural illumination (Munsell Color Co. 1980, Soil Survey Division Staff 1993). According to the Munsell soil color chart, color is reported in terms of the so-called hue, chroma, and value. However, we used a different laboratory procedure based on CIE standards and colorimeter measurements.

Colorimeter measurements provided chromaticity coordinates x and y and the tristimulus value Y of both soil samples and the reference white target. Chromaticity coordinates of all samples were then transformed into tristimulus values XYZ using well-known formulas (CIE 2004):

$$X = x \cdot \left(\frac{Y}{y} \right)$$

$$Z = (1 - x - y) \cdot \left(\frac{Y}{y} \right)$$

Then, tristimulus values were converted into CIELAB (*Commission Internationale de l'Éclairage*, L^* , a^* , and b^*) coordinates:

$$L^* = 116 \times \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \times \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right]$$

$$b^* = 200 \times \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right]$$

where

X , Y , and Z are the tristimulus values of the soil sample

X_n , Y_n , and Z_n are the tristimulus values of the reference white

There are alternative formulas when the quantity X/X_n , Y/Y_n , or Z/Z_n is less than 0.008856 (CIE 2004). However, this rarely happens in soil color measurements.

Finally, CIELAB coordinates were transformed into the quantities L^* , C_{ab}^* , and h_{ab}^* . These quantities are expressed in polar coordinates in what is known as the CIELCH system. The new quantities are the chroma

$$C_{ab}^* = [a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

and the angle of hue

$$h_{ab}^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

CIELAB hue angle is 0 for any stimulus along the positive direction of the a^* axis, also known as the red-green axis.

We prefer CIELCH representation over CIELAB coordinates since C_{ab}^* and h_{ab}^* are physical correlates of the perceptual attributes of color. The CIELCH system is also easier to use than classical Munsell notations when performing numerical computations, as is the case in this study.

36.4 Results and Discussion

The procedures described so far result from a number of relationships which are summarized in this section. It is necessary to note that the results presented here are not based on experimental design but on the sample values themselves. Therefore, we cannot establish true cause-and-effect relationships, and the results should be considered as a first approach to the problem. Nevertheless, the use of GIS together with multivariate statistical methods provides an interesting starting point in the study of soil color from a geospatial perspective.

36.4.1 Lightness (L^*)

There are seven significant variables related to L^* ; five of them are positively correlated and two are negatively correlated (Table 36.1). In this context, positively correlated means that L^* has greater values, i.e., soil color is lighter, and negatively correlated means that soil color is darker. The value of the determination coefficient (R^2) was 39%.

Table 36.1 Regression Analysis of Lightness (L^*)

Parameter	Estimate	<i>p</i> -Value
Constant	19.543	0.2865
Aspect	0.033	0.0194
Geo28: marl	5.093	0.0237
Sand	-0.124	0.0178
Clay	-0.137	0.0637
Carbonate	0.092	0.0586
pH	4.207	0.0456
EC	0.002	0.0185

There are some relationships which were expected. For instance, high carbonate content and parent material no. 28 (white marl) should produce lighter soils. Results referring to aspect, which determines the amount of solar radiation that falls on the terrain surface, are not so obvious. The most surprising results are those of pH and EC (electrical conductivity). They are very difficult to explain because their values can be greatly affected by tillage practices, or water quality, which were not taken into account in this study.

36.4.2 Hue (h_{ab}^*)

There are three significant variables related to hue (Table 36.2). The value of R^2 is 34%.

Slope is positively correlated to hue. This suggests that soils located on higher slopes tend to be less red. Sand and clay are negatively correlated, which suggests that high contents of sand and clay produce lower values of hue. In this context, the soil color approaches red.

36.4.3 Chroma (C_{ab}^*)

There are four significant variables related to chroma. Parent material no. 28 and stoniness are negatively correlated, whereas sand and pH are positively correlated (Table 36.3). The value of R^2 is 39%.

It seems that the color of samples located on white marls is less saturated than other soils. This is in agreement with the expected result. The influence of stoniness (i.e., the percentage of soil surface covered by stones or rocks), sand, and pH on chroma is harder to explain.

Table 36.2 Regression Analysis of Hue (h_{ab}^*)

Parameter	Estimate	<i>p</i> -Value
Constant	82.384	0.0000
Slope	0.324	0.0621
Sand	-0.199	0.0000
Clay	-0.193	0.0010

Table 36.3 Regression Analysis of Chroma (C_{ab}^*)

Parameter	Estimate	<i>p</i> -Value
Constant	-7.776	0.3496
Geo28: marl	-2.352	0.0279
Sand	0.102	0.0000
Stoniness	-0.023	0.0282
pH	4.428	0.0217

Acknowledgment

This work was partially supported by the Generalitat Valenciana (Grant GVPRE/2008/186), Spain.

References

- Bigham, J. M. and E. J. Ciolkosz. 1993. *Soil color*. Madison, WI: SSSA Special Publication Number 31.
- Burrough, P. A. and R. A. McDonnell. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. New York: Oxford University Press.
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage). 2004. *Colorimetry*, 3rd edn. Vienna, Austria: CIE Central Bureau, Publ. 15:2004.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology*. New York: Dover Publications.
- McGarigal, K., S. Cushman, and S. Stafford. 2000. *Multivariate Statistics for Wildlife and Ecology Research*. New York: Springer.
- Munsell Color Co. 1980. *Munsell Soil Color Charts*. New York: Munsell Color Company Inc.
- NCGLA (National Center for Geographic Information and Analysis). 1990. Core curriculum in geographic information science. University of California. <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/u01.html>. Accessed March 20, 2010.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual*. Washington, DC: USDA-SCS.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th edn. Washington, DC: USDA-NRCS.
- Worboys, M. and M. Duckham. 2004. *GIS: A Computing Perspective*. Boca Raton, FL: CRC Press.