

## Índice

|          |                                                             |            |
|----------|-------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>Introducción</b>                                         | <b>1</b>   |
| 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         |
| <b>2</b> | <b>Colorimetría</b>                                         | <b>67</b>  |
| 2.1      | Unidades, magnitudes y terminología . . . . .               | 67         |
| 2.2      | Colorimetría y espacios de color CIE . . . . .              | 75         |
| 2.3      | Instrumentación . . . . .                                   | 105        |
| <b>3</b> | <b>Bases de Datos Espaciales</b>                            | <b>119</b> |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Procedimiento de laboratorio</b>                         | <b>147</b> |
| 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 . . . . .  | 168        |
| 4.5      | Desarrollo de la aplicación informática . . . . . | 176        |
| 4.6      | Procedimiento propuesto . . . . .                 | 179        |
| <b>5</b> | <b>Conclusiones</b>                               | <b>185</b> |
| 5.1      | Perspectivas futuras . . . . .                    | 188        |
|          | <b>Bibliografía</b>                               | <b>193</b> |
| <b>A</b> | <b>Programación</b>                               | <b>207</b> |
| A.1      | Programa CS100A . . . . .                         | 207        |
| A.2      | Programa <i>snn</i> . . . . .                     | 211        |
| A.3      | Formatos de datos espaciales . . . . .            | 213        |
| <b>B</b> | <b>Aplicación</b>                                 | <b>217</b> |

## 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 (Rigg, 1997) . . . . .                   | 77  |
| 2.2  | Diagrama de cromaticidad $rg$ (Fairman et al., 1997) . . . . .                                | 80  |
| 2.3  | Funciones de igualación de color en los espacios RGB y XYZ (Rigg, 1997) . . . . .             | 84  |
| 2.4  | Primarios $X$ $Y$ $Z$ sobre el diagrama de cromaticidad $rg$ (Fairman et al., 1997) . . . . . | 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 . . . . .                | 172 |
| 4.8  | Representación gráfica del método de clasificación kNN . . . . .             | 173 |
| 4.9  | Observación de las tablas Munsell a través del colorímetro . . . . .         | 176 |
| 4.10 | Interfaz del programa de recolección de datos . . . . .                      | 177 |
| 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<br>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 |