Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Optometría y oftalmología | Catálogo General

1-24-2020

Óptica geométrica clínica

Elkin Alexander Sánchez Montenegro
Universidad de La Salle, Bogotá, esanchez@unisalle.edu.co

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/edunisalle_optometria-oftalmologia

Recommended Citation
Sánchez Montenegro, Elkin Alexander, "Óptica geométrica clínica" (2020). *Optometría y oftalmología*. 25.
https://ciencia.lasalle.edu.co/edunisalle_optometria-oftalmologia/25

This Libro is brought to you for free and open access by the Catálogo General at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Optometría y oftalmología by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

Óptica geométrica clínica

Óptica
geométrica clínica

Elkin Alexánder Sánchez Montenegro

UNIVERSIDAD DE
LA SALLE
Bogotá, D. C.
2020

Sánchez Montenegro, Elkin Alexánder
Óptica geométrica clínica / Elkin Alexánder Sánchez Montenegro. - Primera edición. - Bogotá : Ediciones Unisalle, 2020.
232 páginas : ilustraciones, gráficas ; 23 cm.

Incluye índice de figuras
Incluye referencias bibliográficas.
ISBN 978-958-5486-75-1 (impreso)
ISBN 978-958-5486 -76-8 (digital)

1. Optometría 2. Óptica geométrica 3. Reflexión (óptica) 4. Refracción 5. Absorción de la luz I. Título

CDD: 617.7 ed.22
CEP-Universidad de La Salle. Dirección de Bibliotecas

ISBN: 978-958-5486-75-1
e-ISBN: 978-958-5486-76-8
Primera edición: Bogotá, D. C., enero del 2020
© Universidad de La Salle
© Elkin Alexánder Sánchez Montenegro

Edición
Ediciones Unisalle
Cra. 5 n.° 59A-44, Edificio Administrativo, 3.er piso
PBX: (571) 348 8000. Extensiones: 1224 y 1226
edicionesunisalle@lasalle.edu.co
https://ediciones.lasalle.edu.co

Dirección editorial
Alfredo Morales Roa

Coordinación editorial
Andrea del Pilar Sierra Gómez

Corrección de estilo
Sabina Ojeda

Diagramación y diseño de carátula
William Yesid Naizaque Ospina

Impresión
DGP Editores

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este libro por cualquier procedimiento, conforme a lo dispuesto por la ley.
Impreso y hecho en Colombia.

A mis padres por su bondad.

A Telmito y tío Germán.

A mis queridos estudiantes.

A Baruch Spinoza, eminente tallador de lentes.

Y, por supuesto, a Jannis y Juan Pablo.

Agradecimientos

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos al hermano Alberto Prada Sanmiguel, por la confianza que tuvo conmigo en el Decanato de la Facultad de Ciencias de la Salud, al hermano Fabio Humberto Coronado Padilla, por su animación con este servidor lasallista y por ser columna en mi camino académico, a la doctora Carmen Amalia Camacho, porque compartimos retos académicos, y a la familia Chajín Gómez por todo su apoyo.

Prólogo

Todo lo que viene del doctor Elkin Alexánder Sánchez Montenegro es importante, lo cual no sorprende, dada su trayectoria como profesional serio y consagrado tanto en el ejercicio de su labor como en su paso por la academia en varias oportunidades. Recibí su honrosa petición de escribir el prólogo de su libro *Óptica geométrica clínica* y sobra decir que lo hago con el mayor gusto.

La impresión que tuve después de leerlo fue haberme encontrado con un formidable tratado de óptica que merece ser un texto obligatorio en la carrera de Optometría. No es uno más, sino un libro dirigido a los optómetras.

El quehacer de estos especialistas en sus actividades clínicas de consultorio tiene una estrecha relación con la óptica y los fundamentos ópticos de los distintos test clínicos habituales en el examen de refracción: la medición de la agudeza visual, la exploración queratométrica, la retinoscopía y la medición y el control de la acomodación —técnicas subjetivas— están magistralmente tratados e ilustrados.

También se explican los fundamentos ópticos de los instrumentos necesarios para lograr un diagnóstico, como el oftalmoscopio, el retinoscopio, el queratómetro, los optotipos, etc. Otro tanto sucede con los aditamentos oftálmicos usados en la corrección de los defectos de la visión, trátese de anteojos esféricos, cilíndricos y asféricos o de lentes de contacto e intraoculares. La óptica detrás de estos elementos está expuesta de manera amplia y profusamente ilustrada.

El estudiante y el optómetra en ejercicio deben explorar con juicio este magnífico libro o utilizarlo como texto de consulta para comprender en profundidad los principios y fenómenos de la óptica que rigen sus habilidades y competencias frente a la salud visual.

Gabriel Merchán De Mendoza, doctor en Optometría (O. D.)

Contenido

Prólogo 9

Introducción 19

Capítulo 1. De la naturaleza de la luz 21

Óptica geométrica y óptica física 22

La luz: la razón del ser 22

Los múltiples usos de la luz 28

Elementos que fundamentan la óptica geométrica 30

El sistema óptico 30

Capítulo 2. La refracción y la reflexión 41

La refracción 42

Las leyes de la refracción 42

Refracción en una lámina con superficies planas paralelas entre sí 48

Refracción en un prisma 52

Los lentes 62

La reflexión 113

El espejo plano 114

El espejo esférico 116

Capítulo 3. Aberraciones y diafragmas 133

Las aberraciones 134

Tipos de aberraciones 134

Los diafragmas 140

Diafragma de abertura 140

Diafragma de campo 140

Pupilas de entrada y de salida 141

Capítulo 4. Las vergencias 143

¿Qué es la vergencia óptica? 144

Vergencias y superficies esféricas refractoras 147

Los lentes delgados 152

Los lentes gruesos 155

Capítulo 5. Las superficies asféricas 157

Algunas consideraciones preliminares 159

Las coordenadas cartesianas y el plano cartesiano 159

Distancia entre dos puntos en un plano cartesiano 160

Ecuación y pendiente de una recta 160

Ángulo que forman dos rectas con pendientes diferentes 161

Las secciones cónicas 162

Estudio unificado de las secciones cónicas 178

Recta tangente a una curva 179

Óptica en superficies asféricas 179

Superficies asféricas reflectoras 180

Superficies asféricas refractoras 199

El lente elíptico esférico 209

El lente plano hiperbólico 216

El concepto de asfericidad 218

Las superficies asféricas en la práctica 222

Conclusiones 227

Referencias 229

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Longitud de onda versus sensibilidad relativa 23
Figura 1.2. Componentes de una onda 24
Figura 1.3. Comparación entre 2 ondas que viajan en medios con diferentes densidades 26
Figura 1.4. Percepción falsa de los colores 28
Figura 1.5. Descripción del eje óptico 31
Figura 1.6. Tipos de rayos luminosos 32
Figura 1.7. Clases de rayos luminosos 32
Figura 1.8. Rayos paraxiales y marginales 33
Figura 1.9. Características del objeto 35
Figura 1.10. Características de la imagen 36

Capítulo 2

Figura 2.1. Leyes de la refracción 43
Figura 2.2. Refracción en una superficie plana 45
Figura 2.3. El ángulo crítico 45
Figura 2.4. La dispersión escleral 47
Figura 2.5. Método para medir el índice de refracción de los medios oculares 47
Figura 2.6. Superficies de caras planas paralelas 49
Figura 2.7. Experiencia de Erasmus Bartholinus con un romboedro de calcita 51
Figura 2.8. Partes de un prisma 52
Figura 2.9. Marcha de un rayo de luz a través de un prisma 54
Figura 2.10. Desviación mínima de un prisma 57
Figura 2.11. Primera condición de emergencia 58

Figura 2.12. Segunda condición de emergencia 60
Figura 2.13. Dioptría prismática 60
Figura 2.14. Descripción de una superficie esférica refractora 63
Figura 2.15. Método del rayo auxiliar oblicuo y paralelo al rayo incidente en una superficie esférica refractora 66
Figura 2.16. Método de los rayos notables para una superficie esférica refractora 68
Figura 2.17. Método del rayo oblicuo en una superficie esférica refractora para hallar la imagen de un objeto puntual virtual 68
Figura 2.18. Método del rayo oblicuo para superficies esféricas refractoras negativas 69
Figura 2.19. Método de los rayos notables para encontrar la imagen de un objeto lineal virtual en una superficie esférica refractora 69
Figura 2.20. Método de los rayos notables para encontrar la imagen de un objeto lineal real en una superficie esférica refractora cóncava 70
Figura 2.21. Poder dióptrico del ojo y ubicación de la fóvea considerada objeto virtual 72
Figura 2.22. Puntos focales (objeto e imagen) de un lente grueso 74
Figura 2.23. Resolución de un problema sobre lentes gruesos I 76
Figura 2.24. Resolución de un problema sobre lentes gruesos II 77
Figura 2.25. Descripción óptica del lente de Goldmann 79
Figura 2.26. Problema con el lente de Goldmann 81
Figura 2.27. Planos principales de un lente grueso 82
Figura 2.28. Planos principales de varias clases de lentes gruesos 82
Figura 2.29. Distancias focales verdaderas y distancias frontales 83
Figura 2.30. Ejemplo para hallar la posición del plano principal imagen en un lente grueso 86
Figura 2.31. Ejemplo para hallar la posición del plano principal objeto en un lente grueso 86
Figura 2.32. Puntos nodales y centro óptico de un lente grueso 87
Figura 2.33. Centro óptico de varias clases de lentes 88

Figura 2.34. Reemplazo de un lente grueso por uno delgado colocado en el plano principal imagen 89

Figura 2.35. Reemplazo de un lente grueso por uno delgado colocado en el plano principal objeto 90

Figura 2.36. Método para encontrar la posición de la imagen de un objeto puntual con el plano principal imagen de un lente grueso 91

Figura 2.37. Método para encontrar la posición de la imagen de un objeto lineal con los planos principales de un lente grueso 93

Figura 2.38. Deducción de la fórmula de Gauss 94

Figura 2.39. Ejemplo para lentes delgados en el que un objeto puntual se encuentra a *2f* del vértice 100

Figura 2.40. Primer caso de los lentes delgados (O → ∞) 101

Figura 2.41. Segundo caso de los lentes delgados (O entre ∞ y f) 101

Figura 2.42. Tercer caso de los lentes delgados (O = f) 102

Figura 2.43. Cuarto caso de los lentes delgados (O entre f y V) 102

Figura 2.44. Quinto caso de los lentes delgados (O = V) 103

Figura 2.45. Lente delgado divergente con un objeto puntual real 103

Figura 2.46. Lente delgado divergente con un objeto puntual virtual 104

Figura 2.47. Objeto lineal colocado a una distancia *2f* del vértice de un lente delgado 104

Figura 2.48. Sistema compuesto por dos lentes delgados convergentes 107

Figura 2.49. Punto y distancia focal imagen de un sistema compuesto 111

Figura 2.50. Punto y distancia focal objeto de un sistema compuesto 112

Figura 2.51. Método para hallar la imagen de un objeto lineal con los planos principales de un sistema compuesto 112

Figura 2.52. Reflexión difusa (A) y especular (B) 113

Figura 2.53. Las leyes de la reflexión 114

Figura 2.54. Reflexión en un espejo plano 115

Figura 2.55. El espejo esférico 118

Figura 2.56. Primer caso del espejo cóncavo (O → ∞) 119

Figura 2.57. Segundo caso del espejo cóncavo (O entre ∞ y C) 119

Figura 2.58. Tercer caso del espejo cóncavo (O = C) 120
Figura 2.59. Cuarto caso del espejo cóncavo (O entre C y F) 120
Figura 2.60. Quinto caso del espejo cóncavo (O = f) 121
Figura 2.61. Sexto caso del espejo cóncavo (O entre F y V) 122
Figura 2.62. Objeto puntual virtual y espejo cóncavo 122
Figura 2.63. Plano focal imagen de un espejo cóncavo 124
Figura 2.64. Plano focal objeto de un espejo cóncavo 124
Figura 2.65. Método del rayo auxiliar oblicuo para encontrar la imagen de un objeto puntual en un espejo cóncavo 125
Figura 2.66. Método de los rayos notables para encontrar la imagen de un objeto lineal en un espejo cóncavo 125
Figura 2.67. Ecuación de la magnificación 126
Figura 2.68. Seudoefecto del espejo cóncavo del retinoscopio 128
Figura 2.69. Foco objeto de un espejo convexo 129
Figura 2.70. Objeto puntual real frente a un espejo convexo 129
Figura 2.71. Objeto puntual virtual frente a un espejo convexo 130
Figura 2.72. Plano focal imagen de un espejo convexo 130
Figura 2.73. Plano focal objeto de un espejo convexo 131
Figura 2.74. Principio óptico fundamental del queratómetro de Helmholtz . 132

Capítulo 3

Figura 3.1. Aberración de esfericidad 135
Figura 3.2. Aberración comática 136
Figura 3.3. Astigmatismo 137
Figura 3.4. Curvatura de campo 138
Figura 3.5. Distorsión 138
Figura 3.6. Aberración cromática 139
Figura 3.7. Diafragmas de abertura y de campo 141
Figura 3.8. Pupilas de entrada y de salida 142

Capítulo 4

Figura 4.1. De cómo encontrar el valor de una vergencia óptica 147

Capítulo 5

Figura 5.1. Cono segmentado por tres planos para hallar las secciones cónicas 158
Figura 5.2. Ángulo que equivale a la pendiente de una recta y ángulo que forman dos rectas con pendientes diferentes 161
Figura 5.3. Partes de la parábola 163
Figura 5.4. Cómo deducir la ecuación de la parábola 163
Figura 5.5. Partes de una elipse 165
Figura 5.6. Cómo deducir la ecuación de la elipse 166
Figura 5.7. Longitud de los ejes de una elipse 167
Figura 5.8. Determinación por coordenadas de un punto sobre una elipse 167
Figura 5.9. Cómo hallar la constante *2a* en una elipse 168
Figura 5.10. Cómo se puede obtener la cantidad *b* en una elipse 172
Figura 5.11. Partes de la hipérbola 173
Figura 5.12. Cómo deducir la ecuación de la hipérbola 174
Figura 5.13. Determinación por coordenadas de un punto sobre la hipérbola 175
Figura 5.14. Cómo obtener la definición unificada de las secciones cónicas . 178
Figura 5.15. Recta tangente a una elipse 180
Figura 5.16. Espejo parabólico 181
Figura 5.17. Retinoscopio con espejo parabólico 184
Figura 5.18. Primera función del lente retinoscópico 185
Figura 5.19. Segunda función del lente retinoscópico 186
Figura 5.20. Posibles percepciones del examinador al observar los rayos en un retinoscopio con espejo parabólico 187
Figura 5.21. Espejo elíptico cóncavo 189
Figura 5.22. Espejo elíptico convexo 193
Figura 5.23. Campímetro elíptico 193
Figura 5.24. Espejo cóncavo hiperbólico 194
Figura 5.25. Espejo hiperbólico convexo 199
Figura 5.26. Aberración esférica 200

Figura 5.27. Cómo obtener expresiones que definan de manera óptica una superficie elíptica **201**

Figura 5.28. Superficie elíptica refractora convexa **204**

Figura 5.29. Superficie elíptica refractora cóncava **204**

Figura 5.30. Diseño de un lente elíptico esférico **205**

Figura 5.31. Cómo obtener expresiones que definan de manera óptica una superficie hiperbólica **206**

Figura 5.32. Superficie hiperbólica refractora cóncava en dos situaciones ... **208**

Figura 5.33. Superficie hiperbólica refractora convexa en dos situaciones ... **208**

Figura 5.34. Cómo se obtiene una expresión para encontrar la distancia focal de un lente elíptico esférico **210**

Figura 5.35. Generador digital de superficies oftálmicas asféricas **212**

Figura 5.36. Cómo hallar el diámetro máximo de un lente elíptico esférico .. **213**

Figura 5.37. Cómo hallar el diámetro máximo de un lente plano hiperbólico **217**

Figura 5.38. Curvatura de la circunferencia tangente a la parábola $Y^2 = 8X$ en el punto (0,0) **221**

Introducción

[...] Además, esto bastará a modo de introducción para aquellos lectores de inteligencia rápida y buen entendimiento que no estén versados en óptica, si bien quienes estén ya familiarizados con dicha ciencia y hayan manejado cristales captarán más fácilmente cuanto sigue [...].

Isaac Newton, *Opticks* (1704)

Casi todos los estudiantes de los primeros años de Optometría asisten a la clase de Óptica Geométrica más por deber que por devoción. Seguramente, una vez aprobada la asignatura, desechan todo el conocimiento en el último rincón de sus memorias junto a los recuerdos ingratos de la adolescencia o del primer desamor.

Muy pocos seguimos paso a paso y con entusiasmo el inmenso progreso que ofrece la óptica geométrica al explicar con claridad fenómenos causados en el acto visual; también somos pocos los que nos sorprendemos al advertir que el principio óptico que rige la retinoscopía (técnica que cuantifica el error refractivo) es muy parecido al que rige la oftalmoscopía (técnica que evalúa la anatomía de algunas estructuras intraoculares) y quienes, sin darnos cuenta, caemos en el reino de la óptica geométrica al realizar una exploración con el lente de tres espejos.

Con este trabajo busco eliminar el desdén que existe ante esta especialidad. Como es posible que la causa de esa incómoda sensación sea que sus principios, fórmulas y postulados no tienen, en apariencia, aplicación clínica en la optometría, diseñé el texto pensando en los lectores como optómetras, no como físicos. Lo escribí tratando de encontrar en las frases frías de la óptica geométrica un principio optométrico acogedor y transformé los torturadores problemas en divertidos acertijos clínicos. Así, invito a los lectores a "pensar" de manera clínica y a emplear los argumentos de la óptica geométrica; además, mediante el uso de un lenguaje coloquial —propio de los libros de texto—, los motivo para que no pierdan el deseo de avanzar de un capítulo a otro.

En cada página pretendo que los lectores sientan que el conocimiento que adquirieron en sus cursos de Óptica Geométrica les es útil para resolver problemas clínicos de rutina y que la especialidad no solo puede ser una buena alternativa teórica para su desarrollo integral como profesionales, sino también un horizonte para el progreso de su rol científico.

Los primeros apuntes que escribí sobre la óptica geométrica clínica se diseñaron con un buen soporte bibliográfico. Lo difícil comenzó cuando decidí crear ejemplos con aplicación clínica; pero lo logré de forma satisfactoria. Como un libro debe dejar un aporte valioso, me incliné por tratar las superficies asféricas.

El contenido está dividido en cinco capítulos, de modo que los lectores avanzarán de manera progresiva de temas sencillos a otros más complejos. No les deben temer a las matemáticas: tuve especial cuidado en explicar paso a paso sus desarrollos. Aunque da la sensación de que los lectores son "conducidos con la mano", la parte formal matemática se atiende. Por otra parte, el trabajo está profusamente ilustrado y cada figura se explica con detalle. Tuve la fortuna de escribir y realizar todas las figuras del libro. Definitivamente, eso dio muchas ventajas: siempre escribí y dibujé lo que deseé.

Tiene en sus manos un texto exclusivo para optómetras, una nueva alternativa de consulta para el estudiante inquieto y un libro auxiliar para el profesional que quiera profundizar más en el tema.

Elkin Alexánder Sánchez Montenegro
Decano de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de La Salle
Octubre del 2019

Capítulo 1
De la naturaleza de la luz

[...] Dijo Dios: "haya luz"; y hubo luz.
Y vio Dios ser buena la luz, y la separó de las tinieblas.
Génesis 1, 3-4

[...] Esta velocidad está tan cerca de la luz
que parece que tenemos una fuerte razón
para concluir que la luz es, en sí misma,
una perturbación electromagnética en la forma de ondas
propagadas a través del campo electromagnético,
de acuerdo con leyes electromagnéticas [...].
James Clerk Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism* (1873)

La luz es una onda electromagnética[1] de frecuencias situadas entre 4×10^{14} y 8×10^{14} *hertz*[2]. Para entender la totalidad de los fenómenos que se presentan en la propagación, emisión y absorción de la luz es esencial recurrir a la mecánica cuántica[3]. Entonces, la luz está compuesta por partículas de energía electromagnética, llamadas fotones[4]. Si se quieren explicar los fenómenos de propagación de la luz, es preferible considerarla una onda; sin embargo, para describir la acción mutua entre la luz y la materia en los procesos de absorción y emisión, es mejor

1 Una onda electromagnética es aquella que no requiere de un medio para propagarse. La luz se autosustenta en su propagación por el espacio.

2 Un *hertz* equivale a un ciclo por segundo.

3 Esta teoría dice que toda onda lleva una partícula asociada y viceversa.

4 En 1926, el fisicoquímico estadounidense Gilbert Newton Lewis inventó la palabra "fotón". Él escribió: "en consecuencia me tomo la libertad de proponer el nombre de fotón a este nuevo átomo hipotético" (Lewis, 1926).

considerarla una partícula[5]. Al buscar una aplicación en el ojo y hacer un símil con el comentario precedente, resulta útil considerar la luz una onda para estudiar la óptica del ojo, la cual involucra: reflexión, refracción, difracción, polarización y dispersión de la luz, causada por los medios ópticos oculares; pero si se desea analizar los mecanismos de absorción de la luz por parte de la retina y valorar el umbral capaz de disparar una respuesta neural, es más apropiado considerar la luz un conjunto de partículas o fotones.

Óptica geométrica y óptica física

La óptica geométrica estudia la luz desde el concepto de "rayo luminoso", mientras que la física la describe como un fenómeno ondulatorio. Una tercera clasificación es la óptica cuántica —regida por la mecánica cuántica—, la cual interrelaciona la luz con partículas atómicas complementarias entre sí.

Este libro solo aborda la óptica geométrica porque esta tiene mejor aplicación clínica y describe con mayor precisión los principios fundamentales de la óptica ocular, la imagen retinal, los lentes y prismas que la corrigen y los sistemas ópticos especiales (por ejemplo, el telescopio empleado en la baja visión, que posee el mismo principio que el utilizado en la astronomía). Aunque ya se ha delimitado el recorrido de este trabajo, es indispensable hablar de la luz como ente físico responsable del estudio.

La luz: la razón del ser

Si no existiera luz, seguramente la evolución no hubiera creado los ojos y, por ende, no tendría razón de ser la optometría. Quizá la nariz cumpliría las funciones de los ojos y los rinólogos serían los especialistas en optometría. Pero, como sí existe,

5 Cuando Max Planck propuso que Albert Einstein fuera aceptado en la Sociedad de Física de Berlín, desaprobó su artículo sobre la teoría fotoeléctrica, publicado en 1905, diciendo que a un hombre tan importante se le podía perdonar un pequeño error. Planck fue el casi renuente descubridor de la cuantización. Einstein recibió el Premio Nobel de Física 1921 por su concepto del fotón, no por su teoría de la relatividad.

la luz es la piedra angular de toda la estructura científica y clínica de la optometría. Por esto, es necesario conocerla y saber aplicar sus ecuaciones.

La luz forma parte del espectro electromagnético[6] con unos límites no muy bien definidos, debido a que la sensibilidad del ojo se acerca asintóticamente tanto a las longitudes de onda larga como a las cortas. Si de forma arbitraria se consideran límites del espectro visible las longitudes de onda para las cuales la sensibilidad del ojo es del 1 % de su valor máximo, estos límites serían de 430 nm a 690 nm[7], aproximadamente, lo cual constituiría un factor menor que 2 en la longitud de onda considerada de manera física (Halliday y Resnick, 1989) (figura 1.1).

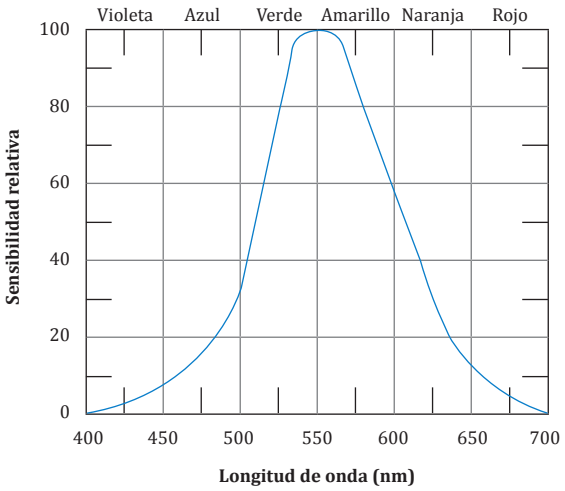

Figura 1.1. Longitud de onda versus sensibilidad relativa

Fuente: Halliday y Resnick (1989).

6 Del latín *spectrum*, que significa fantasma o aparición. El primero en utilizar este término fue Isaac Newton, en 1671, para describir la imagen tremolante, semejante a un arcoíris, que se formaba en la pared de un cuarto oscurecido cuando interponía un prisma en un haz de luz solar que penetraba por un orificio pequeño en la persiana de una ventana de su casa. De los descubrimientos de James Clerk Maxwell se dedujo que la luz era una onda electromagnética y Heinrich Rudolf Hertz probó que otras radiaciones electromagnéticas no eran visibles. Con rapidez, aparecieron grandes cantidades de diferentes ondas electromagnéticas de idéntica naturaleza, pero de distintas propiedades según su frecuencia. El conjunto de todas las ondas constituye el espectro electromagnético, el cual no tiene bien definidos sus límites, pero sí los de cada una de sus bandas.

7 Un nanómetro (nm) equivale a 10^{-9} metros, es decir, 0,000000001 metros.

Como la naturaleza de la luz también puede considerarse un conjunto de partículas llamadas fotones, se revisará cada unidad y su interacción con las ondas. Un fotón, la unidad más elemental de la cual se compone la luz, posee energía, que depende de la frecuencia de la onda electromagnética elegida. Así, al hablar de propiedades de partículas y de ondas, se habla de mecánica cuántica.

La longitud de onda depende de la frecuencia. Entonces, la fusión entre la partícula y la onda yace en la frecuencia. Los textos de física exponen que la luz se enlentece cuando atraviesa un medio ópticamente transmisor; también dicen que la longitud de onda se reduce dentro del medio, pero que la frecuencia siempre permanece constante. Se puede visualizar mejor esta situación con herramientas pedagógicas simples: sujete el extremo de un lazo e inicie un movimiento de arriba abajo, lo cual produce una oscilación del lazo (figura 1.2).

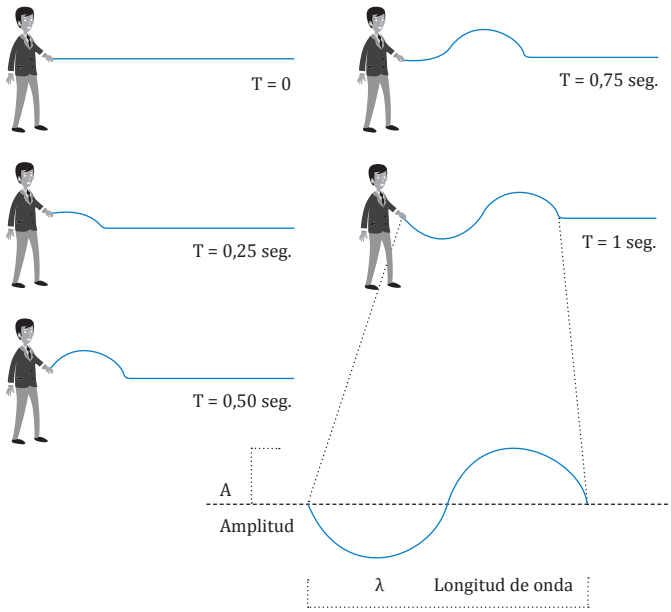

Figura 1.2. Componentes de una onda

Nota: aquí, un optómetra oscila un lazo. Observe el tiempo que transcurre para que se forme toda la onda (periodo). La frecuencia se refiere a las veces que el hombre debe "manotear" la cuerda para formar una onda completa. En el ejemplo, se "manoteó" solo una vez.

Fuente: elaboración propia.

El periodo (T) es el tiempo necesario para completar un ciclo. En el ejemplo, este fue de un segundo, es decir, en un segundo, la mano subió y bajó para formar una onda completa. Se ha llamado a esta acción "manotear" la cuerda; pero ¿cuántas veces se debe "manotear" la cuerda para formar una onda completa? Solo una vez. La frecuencia (f) se refiere a los ciclos por segundo que se dan en una onda cualquiera y es inversa al *T*. En el ejemplo, es de un ciclo por segundo. Así, el periodo y la frecuencia se relacionan mediante la expresión:

$$f = 1/T$$

La longitud de onda (λ) es la distancia que ocupa la onda en un ciclo. También se define como la distancia entre 2 puntos contenidos en la onda, con la misma fase. La amplitud (A) de una onda se refiere a la distancia que hay del eje de referencia horizontal a un punto máximo de este, ya sea que este se encuentre por encima o por debajo del eje. Esta distancia permanece constante junto con la frecuencia.

En el vacío, toda onda electromagnética se propaga con una velocidad constante universal de 3×10^{10} cm/seg, la cual se simboliza con la letra *C*[8]. No obstante, la luz se enlentece al entrar en un medio ópticamente transmisor. La razón entre la velocidad de la luz en el vacío (C) y la velocidad de esta dentro de un medio (V) se conoce como índice de refracción del medio (n'):

$$n' = \frac{C}{V}$$

La frecuencia de una onda electromagnética es constante independientemente del medio en el cual viaja la luz. Por ejemplo, si se agitara una cuerda en ciclos iguales dentro y fuera de una piscina[9], en el agua esta no se desplazaría igual a lo largo de su trayectoria, encontraría resistencia y se apreciaría más corta que en el aire. Por eso, la longitud de onda de la luz sufre un "acortamiento" al estar dentro de un medio más denso que el aire; sin embargo, su frecuencia se mantiene (figura 1.3).

8 Al inicio del capítulo se expone un comentario interesante de Maxwell al encontrar, de manera teórica, que la velocidad de una onda electromagnética es muy parecida a la de la luz (C).

9 Esto incluiría mantener también la amplitud constante en ambos casos.

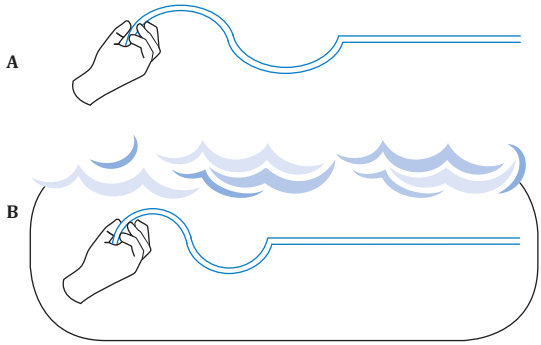

Figura 1.3. Comparación entre 2 ondas que viajan en medios con diferentes densidades

Nota: ejemplo hipotético en el cual usted sujeta una cuerda y la hace oscilar fuera (A) y dentro (B) del agua. Compare la longitud de la onda en los 2 medios. En ambos casos, la mano se desplaza de arriba abajo a igual velocidad (frecuencia).

Fuente: elaboración propia.

Una onda en el vacío tendrá una longitud de λa al calcular la razón entre su velocidad (C) y su frecuencia (f):

$$\lambda a = C/f$$

La velocidad de la luz disminuye al entrar en un medio ópticamente transmisor. La velocidad en el medio (V) dividida entre su frecuencia (f) dará la longitud de onda dentro de ese medio (λm):

$$\lambda m = V/f$$

Para llegar a una expresión interesante, se emplea un arreglo matemático: despejar las velocidades *C* y *V* en ambas fórmulas:

$$\lambda a\ f = C \quad y \quad \lambda m\ f = V$$

Como la longitud de onda es proporcional al cambio de velocidad, se obtiene:

$$\lambda a\ f = C = n'$$

$$\lambda m\ f = V$$

Si se anula la frecuencia, se tiene:

$$\lambda a/\lambda m = n'$$

Entonces:

$$\lambda a/n' = \lambda m$$

Esta última expresión dice que la longitud de onda de la luz en un medio es su longitud de onda en el aire, dividido el índice de refracción del medio en el cual viaja. La fórmula está llena de interrogantes, pero, antes de comenzar a escudriñar su significado, es necesario conocer los colores y las longitudes de onda a la cual pertenece cada uno (tabla 1.1).

Tabla 1.1. Los colores y sus longitudes de onda

Longitud de onda (nm)	Color
430	Violeta
460	Azul
520	Verde
575	Amarillo
600	Naranja
650	Rojo

Fuente: Sears (1960).

Suponga que un ojo emétrope recibe una radiación visible monocromática de 575 nm (amarillo). Al entrar al ojo, la longitud de onda será:

$$\lambda m = 575 \text{ nm}/1{,}3375$$

$$\lambda m = 429{,}9 \text{ nm} \approx 430 \text{ nm}$$

Esto significa que la luz que llega a la retina tendrá una longitud de onda de 430 nm, que corresponde al color violeta. En este punto surge la pregunta: ¿los seres humanos han estado todo el tiempo encerrados en la horrible trampa de los sentidos? El cálculo anterior supone que cuando usted ve un vestido de color violeta,

en la realidad física ese vestido es amarillo, es decir, el color que ha viajado en el espacio desde el vestido hasta la córnea será diferente desde la córnea hasta su retina (figura 1.4).

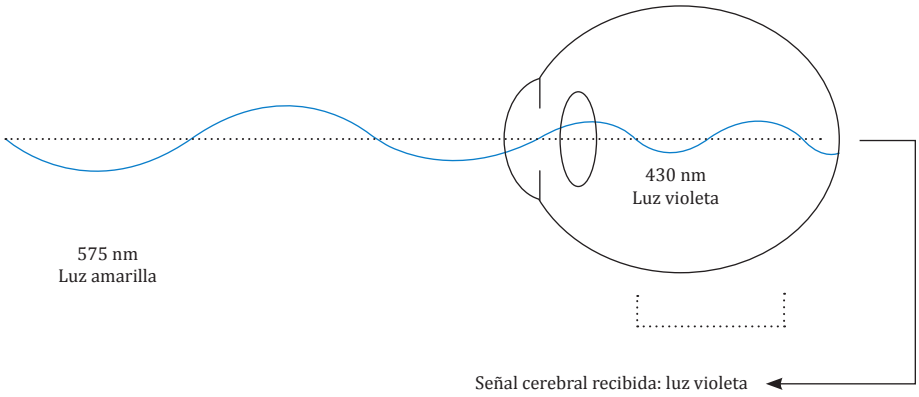

Figura 1.4. Percepción falsa de los colores

Fuente: elaboración propia.

Lo anterior indica que el color que usted está viendo ¡no es el real! Se puede ahondar más: un diabético que ha tenido una crisis experimenta un aumento de la glucosa en la sangre, el cual eleva el índice de refracción ocular. Además de producirse una miopía por índice, ¿podría darse una anomalía pasajera en la percepción de los colores? Este planteamiento no es real, pero se deja esta inquietud para que resuelva el acertijo.

Los múltiples usos de la luz

Los usos clínicos de la luz en la optometría y la oftalmología van desde iluminar un optotipo hasta efectuar una cirugía láser[10]. En teoría, se prefiere iluminar optotipos por reflexión, no por retroiluminación. La razón es sencilla: el sistema visual

10 El término viene del inglés *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificador de luz por emisión estimulada de radiación). Consiste en la obtención de luz en fase con la misma polarización y la misma dirección de propagación de una onda electromagnética que provoca el inicio de la emisión.

observa las cosas en la naturaleza gracias a la luz que se refleja en estas, la cual proviene del sol o de un bombillo. Se ha propuesto medir la agudeza visual (AV) con monitores led que trabajan con retroiluminación, en los cuales los optotipos son letras diseñadas por un programa de computador. Entonces, no existen discrepancias pragmáticas que sugieran una u otra iluminación, pero se prefiere el monitor.

Todo instrumento óptico empleado en la optometría posee un sistema de iluminación. La luz más usada es la de halógeno 13, la cual proporciona buena intensidad luminosa. Los retinoscopios, oftalmoscopios, lámparas de hendidura, campímetros, queratómetros, lensómetros y demás instrumentos ópticos están dotados de bombillas que producen luz de halógeno. Infortunadamente, estas son delicadas y costosas.

Cuando se desee realizar una prueba que valore la percepción de los colores como, por ejemplo, la Farnsworth-Munsell, se deben emplear fuentes que posean una composición espectral completa parecida a la de la luz de halógeno. Las bombillas[11] incandescentes convencionales emanan una luz amarilla rica en el extremo de longitud de onda más largo del espectro visible, pero son relativamente deficientes para el color azul (Moses y Hart, 1988).

"La cantidad de energía absorbida por una superficie depende de la extensión del área expuesta a la energía radiante, la densidad de la energía que llega al área y la duración de la exposición a la fuente radiante" (p. 373) . La energía, como se dijo, puede ser transmitida, absorbida o reflejada. Los fotocoaguladores[12] han sido diseñados con una cuidadosa consideración de estos factores. La energía radiante emitida por estos se transmite a través de los medios oculares y la absorben los tejidos pigmentados. Esta energía absorbida se convierte en calor, lo cual causa las lesiones por quemaduras típicas de la fotocoagulación quirúrgica. Existe mucha literatura que ilustra los múltiples usos de la luz en la clínica. Se le invita a pensar en otras situaciones en las que la luz sea la protagonista en el ámbito clínico.

---

11 La luz de halógeno es aquella que proporciona una radiación luminosa equivalente a la del sol. Las bombillas poseen un filamento inmerso en un halógeno determinado. El análisis espectro-químico de los halógenos permite concluir que se parecen bastante al espectro visible.

12 Son instrumentos dotados con arcos de xenón o láseres de argón. En algunas intervenciones quirúrgicas se emplean para aislar un foco activo de toxoplasmosis en la retina o evitar un posible desprendimiento; para ello, el médico "quema" el tejido periférico a la afección, con el fin de aislar o pegar, por cicatrización, la zona de la retina dañada.

Elementos que fundamentan la óptica geométrica

El sistema óptico

Se llama sistema óptico a un conjunto de medios no opacos separados por superficies, tanto reflectoras como refractoras, por lo general, de formas sencillas (planas, esféricas o asféricas). El sistema es catóptrico si la superficie de separación de los medios es reflectora y dioptrio si es transmisora[13]. Un espejo, una lámina de vidrio, un prisma o un lente son sistemas ópticos, igual que un conjunto de lentes que conforman un telescopio, por ejemplo. De ahora en adelante, cada vez que se hable de los elementos mencionados, se hará referencia a estos como "sistemas ópticos".

Los fundamentos del sistema óptico

Antes de iniciar el estudio de los sistemas ópticos, es importante conocer algunas definiciones vitales para el buen desarrollo teórico de este trabajo.

El eje óptico

El eje óptico es una línea que pasa por el centro de curvatura de la superficie que define un sistema óptico. Así, por ejemplo, en un espejo esférico, el eje es la línea que pasa por el centro del espejo y por el de la esfera de la que este es un casquete esférico. En un lente, es la línea que pasa por los centros de curvatura de las superficies que lo definen. Por supuesto, existen excepciones: si la superficie es asférica[14], el eje será la línea de giro respecto de la cual la superficie permanece invariante independientemente del giro considerado, es como un eje de revolución[15] (figura 1.5).

---

13 Entiéndase como transparente.

14 Una superficie asférica corresponde a una curva cónica (parábola, elipse o hipérbola).

15 El eje óptico pasa por los focos de esas curvas cónicas, estipulados por la geometría analítica (véase el capítulo 5).

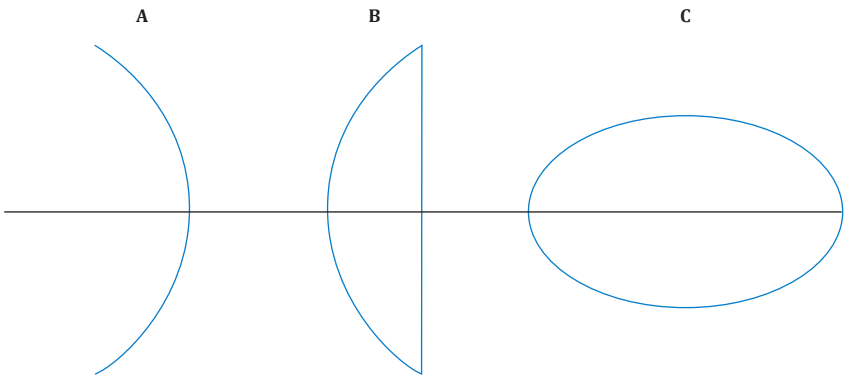

Figura 1.5. Descripción del eje óptico

Nota: en la imagen *A*, un espejo es atravesado por el eje tanto por el centro de la circunferencia que lo genera como del centro de este. En la *B*, un lente plano-esférico es atravesado por el eje, que lo divide en mitades. En la *C*, una elipse es atravesada por su eje y corta ambos focos de esta.

Fuente: elaboración propia.

Los rayos luminosos

Un frente de onda puede reemplazarse por una línea perpendicular a dicho frente, lo cual indica la dirección de propagación de la onda en un medio. Esta línea se conoce como "rayo luminoso" y fundamenta toda la teoría de la óptica geométrica.

Los rayos pueden disponerse de 3 maneras: paralelos, equivalen a frentes de ondas planas; divergentes, equivalen a frentes de ondas circulares que emanan de una fuente; y convergentes, equivalen a frentes de ondas circulares que se reúnen en un punto (figura 1.6). Todo rayo que llegue a un sistema óptico se denomina incidente. Este puede reflejarse o refractarse según el sistema que se considere. En el primer caso se llama rayo reflejado y, en el segundo, refractado. Es posible que este último sufra otra refracción. Este se denomina rayo emergente y será muy mencionado cuando se traten los prismas y lentes gruesos (figura 1.7).

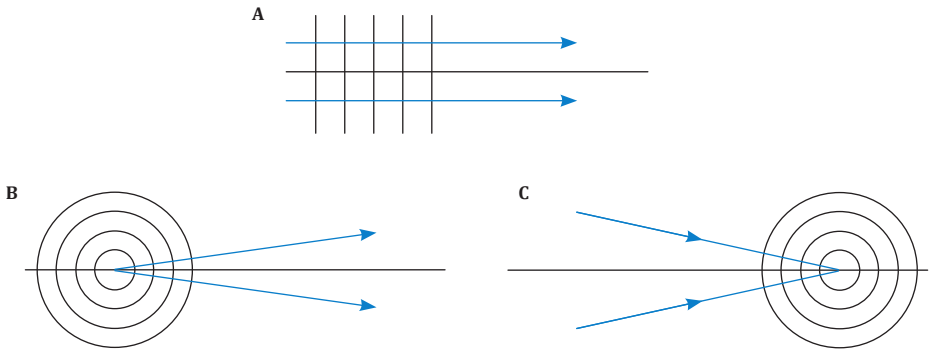

Figura 1.6. Tipos de rayos luminosos

Nota: en el ejemplo *A*, los frentes de onda paralelos entre sí pueden ser reemplazados por rayos luminosos paralelos al eje óptico. En el *B*, los frentes de onda esféricos que parten de un punto pueden ser reemplazados por rayos luminosos divergentes con un punto común en la fuente. En el *C*, los frentes de onda esféricos que llegan a un punto pueden ser reemplazados por rayos luminosos convergentes con un punto común en el sitio de recepción.

Fuente: elaboración propia.

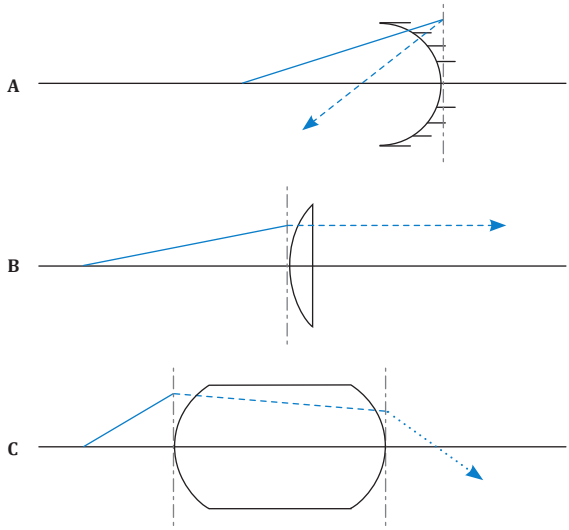

Figura 1.7. Clases de rayos luminosos

Nota: en la imagen *A* se muestra un espejo cóncavo esférico. En la *B*, un lente plano-convexo. En la *C*, un lente biconvexo grueso. Los rayos de línea continua corresponden a los incidentes y los de línea discontinua a los reflejados (*A*) y refractados (*B* y *C*). La línea de puntos corresponde al rayo emergente.

Fuente: elaboración propia.

Los rayos marginales: el cisma de la óptica geométrica

Cuando se estudia la óptica geométrica, solo se explora una parte de esta, debido a que en la naturaleza existen rayos de tipo marginal y paraxial. Los primeros son aquellos rayos luminosos que inciden en un sistema muy alejados del eje óptico; los segundos son los que inciden muy cerca del eje. Esto trae como consecuencia un extraño desenlace: los rayos marginales se comportan diferente que los paraxiales y, en últimas, cada uno sufre reflexiones y refracciones distintas[16].

Los rayos marginales se reflejan o refractan en dirección a un punto sobre el eje óptico cercano a la superficie, mientras que los paraxiales lo hacen sobre un punto más alejado de la superficie. Se prefiere estudiar solo la óptica de estos últimos, porque parece que inciden sobre un plano perpendicular al eje óptico (plano paraxial) pasando por el vértice de la superficie, lo cual brinda mayor estabilidad y facilidad en su trazo (figura 1.8).

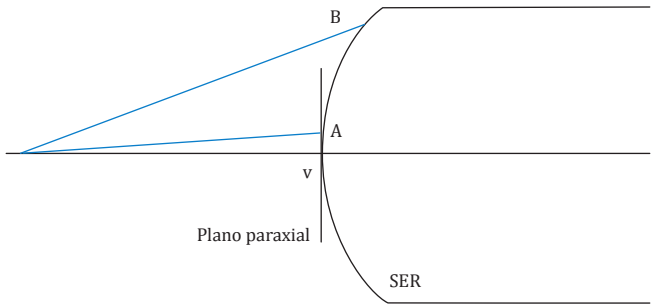

Figura 1.8. Rayos paraxiales y marginales

Nota: el rayo correspondiente a la letra *A* es de naturaleza paraxial, es decir, forma con el eje óptico un ángulo pequeño, a tal punto que se puede considerar como si incidiera en un plano perpendicular al eje que pasa por el vértice (V) del sistema (plano paraxial). En contraste, el rayo *B* forma con el eje un ángulo considerable e incide en una zona del margen del sistema. Por tal razón, este se conoce con el nombre de marginal. *SER* significa superficie esférica refractora.

Fuente: elaboración propia.

16 Este desorden en el enfoque de los rayos, según incidan cerca o lejos de la superficie en el eje óptico, se conoce como aberración esférica y se analizará más adelante. Así mismo, se estudiarán superficies para las cuales la aberración esférica es nula.

Si se habla desde la geometría, los ángulos que forman los rayos paraxiales con el eje óptico tienden a ser cero. Por tal motivo, es importante aclarar que cuando esto sucede, el seno (sen) y la tangente (tan) de un ángulo muy pequeño pueden reemplazarse por el ángulo mismo y el coseno (cos) por la unidad. En términos matemáticos, para un ángulo θ se expresaría:

$$\text{Sen } \theta \approx \theta \text{ si y solo si } \theta \to 0$$

$$\text{Tan } \theta \approx \theta \text{ si y solo si } \theta \to 0$$

$$\text{Cos } \theta \approx 1 \text{ si y solo si } \theta \to 0$$

Estas relaciones serán relevantes en los casos en los cuales, al deducir expresiones matemáticas que definan sistemas ópticos, se reemplacen las funciones trigonométricas que aparezcan allí por los ángulos o la unidad.

El objeto

Un objeto es una cosa material determinada. En la óptica, es el punto de referencia más significativo, dado que es la base para encontrar la naturaleza, la posición y el tamaño de la imagen producida por un sistema óptico. El objeto determinará si los rayos incidentes partirán de él o hacia él, es decir, estos rayos siempre se trazarán con el objeto en su recorrido.

Si los rayos incidentes salen del objeto, este será real; pero si se dirigen a él, será virtual[17]. Un objeto puede ser puntual si carece de dimensiones, y lineal si posee, al menos, altura (figura 1.9).

17 En la naturaleza solo existen objetos reales. Los virtuales se producen de forma artificial.

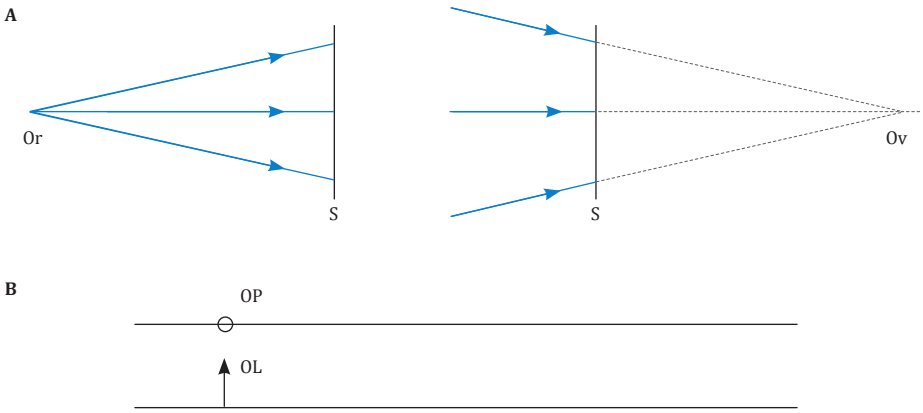

Figura 1.9. Características del objeto

Nota: las diferentes maneras en que van dispuestos los objetos en la óptica geométrica.

A: objeto real (Or) y objeto virtual (Ov). Note cómo los rayos incidentes parten de este en el primer caso y cómo se dirigen a este en el segundo caso.

S: corresponde a un sistema óptico cualquiera.

B: objeto puntual (OP) y objeto lineal (OL). El primero carece de dimensiones y el segundo posee, al menos, altura.

Fuente: elaboración propia.

La imagen

La imagen es el resultado final de un sistema óptico que ha modificado la marcha de los rayos incidentes. Siempre la forman rayos reflejados o refractados (en estos últimos hay que incluir los emergentes). Al igual que el objeto, la imagen puede ser real, si los rayos se dirigen a un punto unificado correspondiente a esta, o virtual, si pareciera que estos rayos salieran de dicho punto[18]. En otras palabras, es real si puede colocarse en una pantalla y virtual si esto no es posible. También se clasifica como puntual si carece de dimensiones, o lineal si posee, al menos, altura (figura 1.10).

18 Cuando esto sucede, la imagen la forman las proyecciones hacia atrás de los rayos en cuestión.

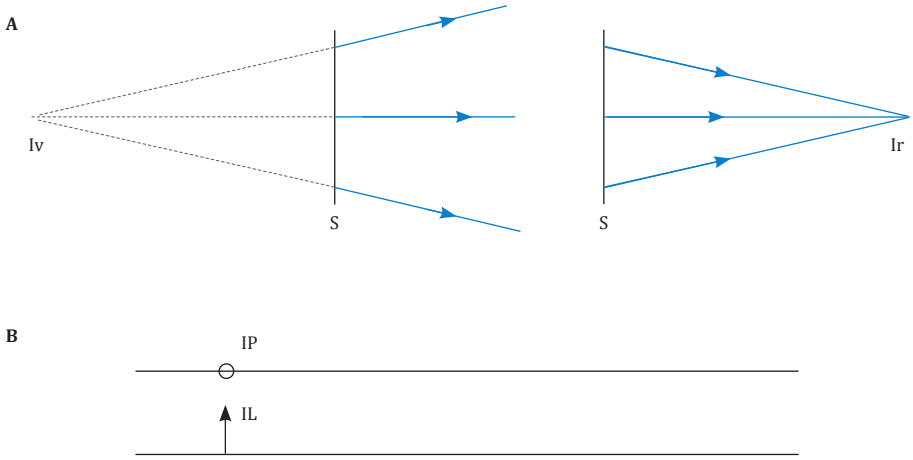

Figura 1.10. Características de la imagen

Nota: las diferentes maneras en que van dispuestas las imágenes en la óptica geométrica.

A: imagen virtual (Iv) e imagen real (Ir). Note que parece que los rayos en *A* (en este caso refractados) salieran de la *Iv*, entonces, la imagen la forman las proyecciones hacia atrás de los estos (línea discontinua). La imagen real se forma por los rayos que se reúnen en un punto unificado.

S: corresponde a un sistema óptico cualquiera.

B: imagen puntual (IP) e imagen lineal (IL). La primera carece de dimensiones y la segunda posee, al menos, altura.

Fuente: elaboración propia.

Los sistemas ópticos que se van a considerar

A lo largo del trabajo se estudiarán varios sistemas de manera individual para, luego, agruparlos y darles sentido práctico. Se iniciará el viaje analizando lo que sucede cuando la luz incide en superficies planas refractoras o reflectoras. Después, se continuará con las superficies esféricas refractoras, los famosos lentes y los espejos esféricos (cóncavos y convexos); además, se estudiarán de forma breve las aberraciones de la óptica y se revisarán los diafragmas y su importancia en la optometría para culminar con un aspecto poco convencional: los sistemas ópticos con superficies asféricas.

Los puntos cardinales

Los sistemas ópticos poseen puntos claves en el eje óptico, los cuales tienen propiedades interesantes. Estos puntos, llamados cardinales[19], solo cumplirán con sus propiedades para el mundo privilegiado de los rayos paraxiales. Estos son:

a) Los focos (objeto e imagen).
b) Los puntos principales (objeto e imagen).
c) Los puntos nodales (objeto e imagen).

Aparte de los puntos cardinales, existen otros que hacen parte del cuerpo físico del sistema y son de referencia:

a) El vértice (punto de corte de la superficie con el eje).
b) El centro de curvatura (punto sobre el eje que corresponde al centro de la circunferencia que genera la superficie).

Todos se definirán más adelante cuando se trabaje en el campo que les compete. Sin embargo, es menester explicar el foco: se llama foco objeto al punto sobre el eje óptico, de manera tal que todo rayo luminoso que parta de él o hacia él saldrá del sistema óptico paralelo al eje óptico involucrado. Por otro lado, se llama foco imagen al punto sobre el eje óptico, de manera tal que todo rayo luminoso que incida paralelo al eje óptico de un sistema se dirigirá hacia él o saldrá como si emanara de él (figuras 2.22, 2.40, 2.42, 2.56 y 2.60). Ahora, estos se nombrarán para que se fusionen e integren al convenio de signos empleado en la óptica. Es útil conocerlos antes de saber, incluso, el verdadero significado de esos puntos.

El convenio de signos

En el recorrido del texto se seguirá un convenio para estar siempre de acuerdo con el momento de calcular de modo teórico o gráfico la posición o el tamaño de una imagen. El convenio de signos es una serie de reglas inventadas por los físicos para

19 Se les dio esa denominación porque "orientan" a la persona interesada en encontrar la imagen que producirá un sistema óptico, ya sea que para ello emplee lápiz y papel o un *software*.

no caer en la horrible sensación del desacuerdo. Este ayuda a conocer la naturaleza del objeto y de la imagen, si esta es derecha o invertida y si las superficies de los sistemas ópticos involucrados son planas, cóncavas o convexas. Además, es una guía para ubicar los puntos cardinales e impulsa a las personas a tener una actitud democrática (quizás esta es su función más importante). El convenio sugiere:

a) El eje óptico siempre será horizontal y las superficies de los sistemas ópticos verticales, en relación con el eje.

b) Los rayos incidentes siempre viajarán de izquierda a derecha.

Para los espejos (tabla 1.2):

a) Todo objeto (S) colocado a la izquierda del vértice (V) será real y tendrá signo positivo. Si se coloca a la derecha del vértice, será virtual y tendrá signo negativo.

b) Toda imagen (S') colocada a la izquierda del vértice (V) será real y tendrá signo positivo. Si se coloca a la derecha del vértice, será virtual y tendrá signo negativo.

c) El foco (f) de un espejo esférico cóncavo estará siempre a la izquierda de su vértice y tendrá signo positivo. El de uno convexo siempre estará a la derecha de su vértice y tendrá signo negativo.

d) El centro de curvatura (C) de un espejo cóncavo está a la izquierda del vértice (V) y su radio (R) será negativo. El de uno convexo está a la derecha del vértice y su radio será positivo.

e) Si el objeto es lineal, su altura (Y) será positiva si se encuentra arriba del eje. El objeto estará derecho. Pero si su altura es negativa, este se encuentra abajo del eje y el objeto estará invertido.

f) Si la imagen es lineal, su altura (Y') será positiva si se encuentra arriba del eje. La imagen estará derecha. Pero si su altura es negativa, esta se encuentra abajo del eje y la imagen estará invertida.

Tabla 1.2. Convenio de signos para espejos esféricos

Variable	Signo	
	+	–
S	Izquierda de *V*, objeto real.	Derecha de *V*, objeto virtual.
S'	Derecha de *V*, imagen real.	Izquierda de *V*, imagen virtual.
F	Espejo cóncavo.	Espejo convexo.
R	*C* a la derecha de *V*, convexo.	*C* a la izquierda de *V*, cóncavo.
Y	Arriba del eje, objeto derecho.	Debajo del eje, objeto invertido.
Y'	Arriba del eje, imagen derecha.	Debajo del eje, imagen invertida.

Fuente: Hecht y Zajac (1990).

Para las superficies esféricas refractoras y los lentes (tabla 1.3):

a) El espacio que se encuentre a la izquierda de una superficie será el espacio objeto y el que esté a la derecha será el espacio imagen.

b) Todo objeto situado a la izquierda del vértice (V) de un sistema tendrá una distancia objeto positiva (S) y será de naturaleza real. Si el objeto va a la derecha, tendrá una distancia objeto negativa y será de naturaleza virtual.

c) Toda imagen situada a la derecha del vértice (V) de un sistema tendrá una distancia imagen positiva (S') y será de naturaleza real. Si la imagen va situada a la izquierda, tendrá una distancia imagen negativa y será de naturaleza virtual.

d) El foco objeto (f) será positivo si se encuentra a la izquierda del vértice del sistema. Será negativo si está a la derecha.

e) El foco imagen (f') será positivo si se encuentra a la derecha del vértice del sistema. Será negativo si está a la izquierda.

f) El centro de curvatura (C) de una superficie convexa está a la derecha del vértice (V) y su radio (R) será positivo. El de una cóncava está a la izquierda y su radio será negativo.

g) Si la distancia *X*[20] se mide desde el foco objeto hasta el objeto como si este último estuviera a la izquierda de dicho foco, entonces *X* es positiva. Pero si sucede lo contrario, *X* es negativa. Si la distancia *X'* se mide desde el foco imagen hasta la imagen como si esta última estuviera a la derecha de dicho foco, entonces *X'* es positiva. Si sucede lo contrario, *X'* es negativa.

h) Si el objeto es lineal, su altura (Y) será positiva si se encuentra arriba del eje; el objeto estará derecho. Su altura será negativa si se encuentra debajo del eje; el objeto estará invertido.

i) Si la imagen es lineal, su altura (Y') será positiva si se encuentra arriba del eje; la imagen estará derecha. Su altura será negativa si se encuentra debajo del eje; la imagen estará invertida.

Tabla 1.3. Convenio de signos para superficies refractoras y lentes delgados

Variable	Signo	
	+	–
S	Izquierda de *V*, objeto real.	Derecha de *V*, objeto virtual.
S'	Derecha de *V*, imagen real.	Izquierda de *V*, imagen virtual.
f f'	Lente convergente.	Lente divergente.
R	*C* a la derecha de *V*, convexo.	*C* a la izquierda de *V*, cóncavo.
Y	Arriba del eje, objeto derecho.	Debajo del eje, objeto invertido.
Y'	Arriba del eje, imagen derecha.	Debajo del eje, imagen invertida.

Fuente: Hecht y Zajac (1990).

20 En 1704, Isaac Newton dedujo unas fórmulas para lentes que se mencionarán más adelante y que aparecieron en su obra *Opticks*, en la cual involucra nuevos términos: *X* y *X'*. El primero se refiere a la distancia que hay del objeto al foco objeto; el segundo, a la distancia que hay de la imagen a su foco imagen. Por supuesto, el convenio de signos acoge estos puntos.