CAPÍTULO 2
Cambios anatómicos, sensoriales y de vía nerviosas del desarrollo visual

Micaela González

Introducción

Al nacer, el globo ocular cuenta con todas sus estructuras anatómicamente formadas, tanto para los recién nacidos a término (RNT) como para los prematuros (RNP). Sin embargo, durante el desarrollo posterior, se producen cambios en el tamaño de la longitud axial, en el poder dióptrico de la Córnea y el Cristalino, en la reorganización celular de la Retina y en el Cuerpo Geniculado Lateral (CGL), como así también en la mielinización de las vías nerviosas. Estos procesos suceden por la oxigenación de los tejidos y la estimulación visual de diversos factores provenientes del medio ambiente extrauterino que tendrán una acción sobre las reacciones sensoriales y neuromotoras oculares, permitiendo el completo desarrollo del sistema visual. (Gil del Río, 1977).

El desarrollo anatómico del sistema visual dependerá en gran parte de su desarrollo funcional, que será efectivo si no existen obstáculos en la sincronización de ambas retinas. Para lograr esto, es esencial que factores como la refracción ocular, la acomodación y otros se desarrollen de manera adecuada y coordinada. Cualquier alteración o mal funcionamiento en alguno de estos aspectos puede alterar o impedir el desarrollo global del sistema visual.(Dr. López Alemany, 2005).

A lo largo de este capítulo iremos describiendo los principales cambios que experimenta la vía visual con el objetivo de evidenciar como cada uno de sus componentes contribuye a la maduración y al funcionamiento del sistema visual.

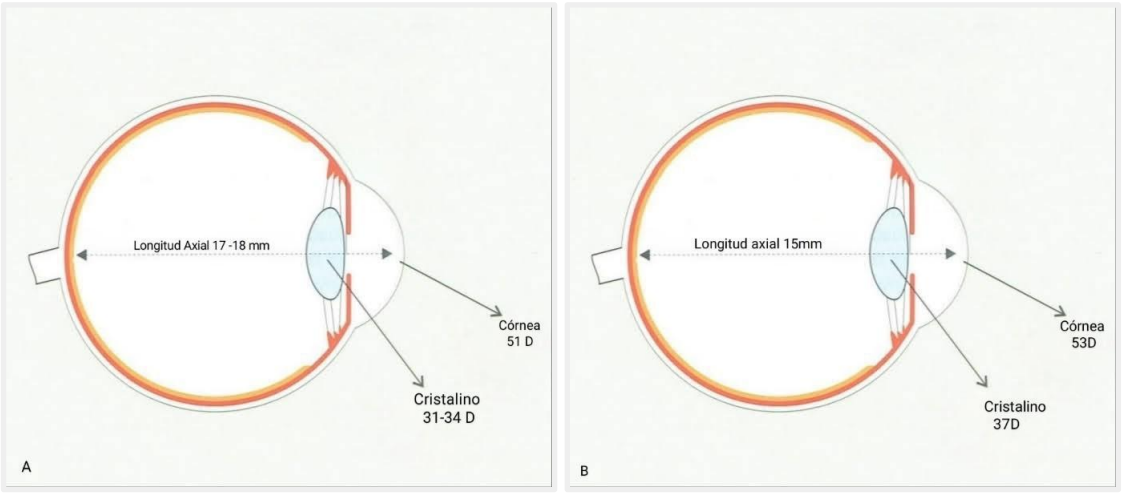
2.1 Cambios estructurales posnatales de la vía visual

El proceso visual requiere de la integración perfecta de múltiples estructuras, desde el ojo hasta la maduración de la corteza cerebral, donde los componentes se desarrollan en paralelo, interactuando para obtener un funcionamiento óptimo del sistema visual.

Antes de abordar los cambios estructurales de la vía visual es preciso conocer los cambios físicos más relevantes que se presentan en los ojos de los RNT y los RNP, que forman parte del desarrollo visual monocular y binocular: el tamaño (largo axial) del Globo Ocular y los valores dióptricos de la Córnea y el Cristalino. En cuanto al largo axial, los RNT presentan una longitud

entre 17 a 18 mm aproximadamente, lo que equivale al 74% de la longitud en adulto (Taylor, 2005), y de 15 mm para los RNP, pudiendo aumentar hasta los 24 mm, a la edad de 6 años, momento en que alcanza el mayor crecimiento, y obteniendo así valores similares a los de un adulto. Se considera que hacia los 13 años de edad, el ojo ya ha alcanzado su punto final del desarrollo (Taylor, 2005; Merchán, 2012).

Figura 2.1 *Valor de los componentes refractivos del globo ocular.*



Nota: Fig A: Valores de los componentes refractivos del globo ocular en recién nacidos a término. Fig. B: Valores de los componentes refractivos del globo ocular en prematuros. *Fuente*: Adaptación del *Manual de Optometría* Martín-Vecilla (2010).

Por su parte, la Córnea al momento del nacimiento presenta un poder dióptrico de 51 D en RNT y 53 D en RNP, que disminuye notablemente a los 6 meses de vida a valores entre 43 - 44 D, manteniéndose estable entre los 2 y 3 años (Merchán, 2012). La observación es similar para el valor dióptrico del Cristalino, donde parte de 31 a 34 D en RNT y 37 D en RNP y sufre un decrecimiento a 19 D, alrededor de los 9 meses de vida, etapa en la cual también se aproxima a los valores del adulto (Merchán, 2014).

Tabla 2.1 *Evolución de los elementos ópticos del globo ocular.*

	RNT	RNP	ADULTO
LONGITUD AXIAL	17mm	15mm	24mm
CÓRNEA	51D	53D	43-44D
CRISTALINO	31-34D	37D	17-19 D

Fuente: González Micaela.

Desarrollo visual

El desarrollo visual, como comentamos anteriormente es el resultado de todos los estímulos que se dan desde el nacimiento para que puedan producirse conexiones neuronales, el desarrollo espontáneo del cerebro y la vía visual. Ocurre de manera monocular, en un principio, y comprende:

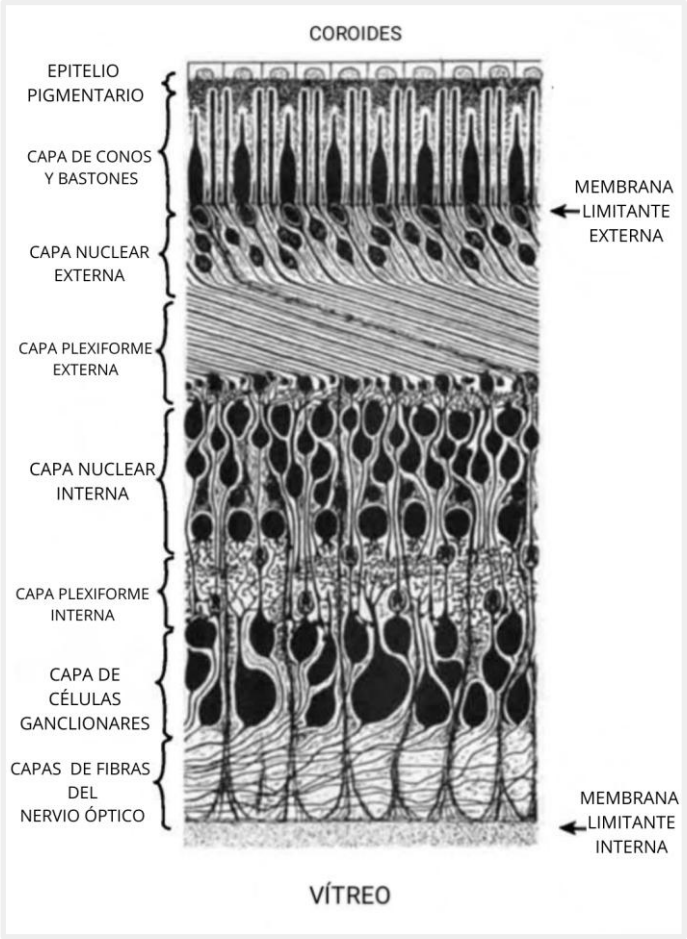
- Organización retinal y fijación.
- Agudeza visual.
- Acomodación.
- Vía visual:
    - Desarrollo del Cuerpo Geniculado Lateral.
    - Desarrollo de la Corteza.
- Movimientos oculares.

Organización retinal y fijación

La retina es la capa más interna y sensible del ojo, que se extiende desde la cabeza del nervio óptico hasta la ora serrata o la zona de transición con el cuerpo ciliar (Guerrero Vargas, 2006), cubriendo más de la mitad de la superficie posterior del globo ocular. Se encuentra apoyada sobre el humor vítreo responsable del volumen del órgano visual, y por fuera limita con la coroides. Podríamos decir que se compone de tres zonas: el polo posterior que incluye la papila y la mácula, la media periferia donde se encuentran distribuidos los ramales arteriovenosos de la arteria y vena central de la retina, y por último, la ora serrata, que marca el límite externo de la retina, en estrecha relación con el cuerpo ciliar.

Está integrada por dos planos: uno externo o pigmentado, denominado Epitelio Pigmentario (EPR), y uno interno neurosensorial que forma las diez capas que se describen clásicamente (Fig 2.2) donde se encuentran las células fotorreceptoras (conos y bastones), encargadas de convertir la luz en señales eléctricas, localizadas en la capa de fotorreceptores; las células bipolares, que transmiten las señales de los fotorreceptores a las células ganglionares, y se encuentran en la capa nuclear interna de la retina. Por último, las células ganglionares, ubicadas en la capa más externa de la retina, forman el nervio óptico y transmiten las señales visuales al cerebro. En cuanto al desarrollo de la retina, estas células son las primeras en diferenciarse durante la etapa embrionaria, a partir de una célula progenitora retiniana. Posteriormente, se desarrollan las células horizontales, los conos, las células amacrinas, los bastones, las células bipolares y las células de Müller, en distintas etapas que se solapan entre sí. (Taylor, 2005).

Figura 2.2. *Capas de la retina*



Nota: Diagrama transversal de las capas de la retina. *Fuente*:Benjamin, W. (2006). *Borish's Clinical Refraction* (2da Ed). Elsevier.

Al nacer, aunque la retina ya está formada y posee su estructura básica, no tiene la capacidad de procesar la información visual de manera eficaz, ya que las conexiones entre sus capas aún no están completamente refinadas.

Desarrollo monocular de la retina

El desarrollo monocular se inicia en la retina por la diferenciación macular y continúa su proceso hasta los 4 o 5 años (Borrás, 1998). Al nacer nuestra retina es inmadura dado que los conos y bastones (células fotorreceptoras) se encuentran desorganizados, generando una baja agudeza visual y la ausencia o falta de precisión de la fijación central; en consecuencia en el neonato la visión está dada por la retina periférica. Posteriormente, con el estímulo visual, se producen cambios en la configuración de la retina donde la fóvea se reorganiza, desarrollándose antes que el resto de la retina periférica y contribuyendo a la mejora de las capacidades visuales.

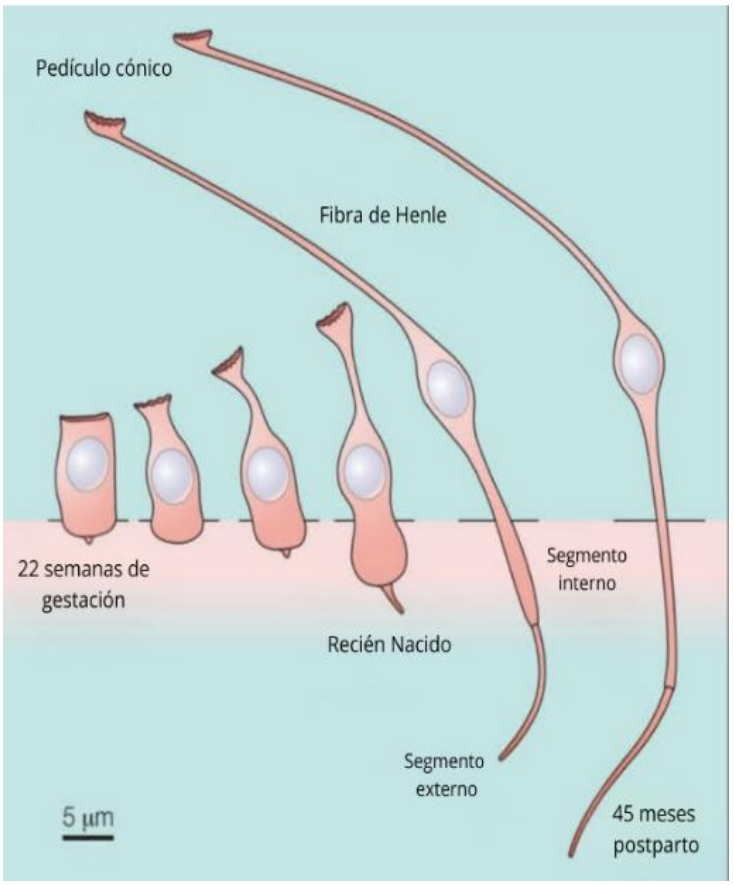
La mácula comienza su diferenciación del resto de la retina a medida que los conos migran hacia la fóvea, aumentando su densidad en esa área, que inicialmente se presenta como una protuberancia formada por células ganglionares. Durante las 25 semanas posteriores al nacimiento, estas células se desplazan junto con las células de la capa nuclear interna (células

bipolares), hacia la periferia, formando la depresión foveal. Este proceso se completa en los primeros 15 meses de vida, periodo en el que maduran las células (Taylor, 2005). A medida que los fotorreceptores y las células ganglionares migran hacia direcciones opuestas, establecen prolongaciones de conexión, los axones especializados que formarán las capas de fibra de Henle, las cuales rodean a la fóvea en el adulto. (Taylor,2005).

Simultáneamente a los procesos de migración celular, se produce el alargamiento de los segmentos externos de los conos, un proceso que ocurre de forma fisiológica, independientemente de la presencia de estímulos visuales, entre los 45 y 48 meses. A medida que los conos maduran, desarrollan estructuras especializadas y se agrupan de manera que favorecen la resolución de objetivos visuales finos. (Hansel, 2016).

De manera similar, la diferenciación de los bastones se inicia en la retina central y se extiende hacia la periferia. A medida que avanzan, durante la 10ma semana de vida, sus segmentos externos aumentan de tamaño, aproximándose a las dimensiones de un ojo adulto hacia los 6 meses de vida (Barbany, 2007).

Figura 2.3 *Etapas de desarrollo de un cono foveal*



Nota: dibujo esquemático de desarrollo de un cono foveal humano: a las 22 semanas de gestación, en el recién nacido y a los 15 y 45 meses postparto. *Fuente*: Taylor, D. Hoyt,c. (2005). *Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. Elsevier Ltd: London and San Francisco.

Aunque ambas células fotorreceptoras poseen una estructura celular similar, difieren en su forma y función. Los bastones, que superan en número a los conos, son largos y delgados, y son los responsables de nuestra visión con poca luz: se encargan de los movimientos de la periferia, de las formas y del alto contraste (blanco y negro). En cambio, los conos son más cortos y gruesos, y requieren de una luz mucho más brillante para funcionar adecuadamente: intervienen en la visión en detalle del campo visual central, de la visión de los colores y de la máxima agudeza visual. (Hubel, 2000).

Tanto los bastones como los conos contienen pigmentos que son sensibles a la luz. En el caso de los bastones, todos tienen el mismo pigmento, mientras que en los conos se distinguen tres tipos, cada uno sensible a una longitud de onda específica con un pigmento visual distinto. Los pigmentos de los conos responden a longitudes de onda cortas (aproximadamente 419 nm, luz azul), medias (alrededor de 534-531 nm, luz verde) y largas (cerca de 564- 559 nm, luz roja). Estas variaciones son las que permiten que el sistema visual tenga la percepción del color. (Kandel, 1997; Urtubia, 1999).

Dado que en la retina poseemos 125 millones de conos y bastones, pero solo un millón de células ganglionares, la conducción de la información visual varía a lo largo de toda su superficie. En la fóvea y sus alrededores inmediatos no hay convergencia de células fotorreceptoras, lo que significa que cada cono se conecta con una única célula bipolar, que a su vez se enlaza con una célula ganglionar. Sin embargo, en la periferia de la retina, a medida que nos alejamos del centro, varios fotorreceptores convergen en una sola célula bipolar, y varias de estas células se conectan con una única célula ganglionar. Este alto nivel de convergencia, presente en gran parte de la retina, ayuda a entender cómo es posible que exista una proporción de 125:1 entre fotorreceptores y fibras del nervio óptico sin que nuestra visión sea deficiente. (Hubel, 2000; Rojas, 2012).

A pesar de que la diferenciación de la fóvea central se completa alrededor de los 6 meses, la maduración de la retina en su conjunto continúa durante un periodo más largo. Esta maduración puede demorar entre 12 y 15 meses después del parto, y en algunos casos, hasta 4 años antes de que la retina adquiera una estructura similar a la de un adulto. Este periodo se corresponde con diversos aspectos del desarrollo visual (Taylor, 2005).

Fijación

La fijación es el reflejo visual que permite a cada ojo dirigir, posicionar la mirada hacia un objeto y mantenerla en él. Se determina en función de la zona retinal que asuma la dirección visual; cuando las imágenes captadas en el campo visual se focalizan en la fóvea, se produce la *fijación central* estimulando el desarrollo de diferentes capacidades visuales como la acomodación, el alargamiento externo de los fotorreceptores, el normal desarrollo de la visión; pero puede suceder que durante el nacimiento o hasta los dos años, la imagen que ingresa al ojo no impacte en la fóvea, lo que lleva a que la retina, el cuerpo geniculado y el córtex aprendan a fijar con otra área extrafoveal, originando así la *fijación excéntrica*.

Es el primer reflejo postnatal que aparece, simultáneamente con el desarrollo de la retina, de forma inestable entre la 2da y 3er semana de vida, aunque puede estar presente desde el nacimiento. Desde la 6ta a la 8va semana, comienza a ser constante para mantener los ojos en un punto fijo; de esta manera entre el 2do y 3er mes, el bebé desarrolla la capacidad de fijación en ambos ojos que, junto con los movimientos vergenciales, permitirán el progreso de la visión binocular. Se estima que alrededor del 6to mes la visión binocular se encuentra establecida (Rowe, 2012; Borrás 1998). Hacia el 2do año de vida, los ojos deberán fijar al mismo tiempo el mismo objeto, sin desviaciones, para un normal desarrollo del cuerpo geniculado lateral del córtex visual y evitar de esta forma, la ambliopía (Ver en cap. 5).

Desarrollo de la Agudeza Visual (AV)

La agudeza visual (AV) es la capacidad del sistema visual para percibir, identificar y discriminar los detalles finos de un objeto observado. Para su correcta evaluación, es fundamental considerar no solo la agudeza del ojo en sí mismo sino también el estado funcional y estructural de todas las partes del sistema visual involucradas: desde los medios transparentes (córnea, cristalino, humor vítreo), hasta la retina, las vías ópticas y la corteza visual. En el caso de los niños, esta capacidad está en proceso de maduración y depende del desarrollo anatómico y fisiológico de estas estructuras, a diferencia de lo que ocurre en los adultos, cuyo sistema visual ya ha alcanzado la madurez funcional.

No obstante, la agudeza visual no depende únicamente de factores biológicos o estructurales. También está influida por condiciones externas del entorno visual. Entre estos factores se encuentran el nivel de iluminación del ambiente, el contraste entre el estímulo y el fondo, el color del objeto observado y la intensidad luminosa del estímulo mismo. Todos estos elementos pueden modificar significativamente el rendimiento visual y deben ser tenidos en cuenta al momento de evaluar la agudeza visual, especialmente en poblaciones pediátricas (Guerrero, 2006).

Durante la etapa neonatal y los primeros meses de vida, la AV es limitada por la inmadurez de sus tejidos, principalmente de la fóvea, donde aún no se ha completado la migración y el empaquetamiento de los conos hacia la región central de la mácula. Este proceso, junto con la mielinización progresiva de las vías ópticas y el desarrollo de la corteza visual primaria, es determinante para el rápido aumento de la AV observado durante el primer año, en ausencia de errores refractivos y patologías.

En esta etapa del desarrollo, en la que la cooperación del paciente es limitada, las técnicas objetivas utilizadas para la valoración de la AV son el nistagmo optocinético, el test de mirada preferencial y los potenciales visuales evocados. A partir de algunos estudios basados en el test de mirada preferencial, se pudo observar que los recién nacidos pueden discriminar una rejilla entre 30 y 60 segundos de arco, mientras que los adultos pueden resolver

una rejilla menor a 1 minuto de arco, equivalentes al 20/20 en la escala de Snellen; en otras palabras la AV en recién nacidos es aproximadamente 40 veces peor que la AV normal en adultos (Merchán, 2010).

En la siguiente tabla observamos la modificación que experimenta la AV desde el nacimiento, hacia el primer año de vida.

Tabla 2.2 *Valores Normativos de Agudeza Visual*

	NISTAGMO OPTOCINÉTICO	MIRADA PREFERENCIAL	POTENCIALES VISUALES EVOCADOS
RECIEN NACIDO	20/400	20/700	20/800
1 MES	20/400	20/580	20/400
2 MESES	20/400	20/250	20/200
3 MESES	20/350	20/200	20/150
4 MESES	20/225	20/160	20/70
5 MESES	20/150	20/140	20/50
6 MESES	20/100	20/120	20/40 - 20/30
9 MESES		20/90	20/20
11 MESES		20/50	20/20
12 MESES		20/40	20/20

Nota: Valores normativos de AV durante el primer año de vida, según edad y el método de examen de AV empleado.
Fuente: Borrás y Col (1998) "*Visión Binocular diagnóstico y tratamiento*". Edición UPC: España.

Como se muestra en la tabla, la AV en recién nacidos típicamente se encuentra entre 20/400–20/300 en la escala de Snellen. A partir de allí, aumenta de manera significativa durante los primeros 6 meses de vida, tras los cuales el desarrollo comienza a ser más lento. En esta etapa tanto la agudeza monocular como la binocular aumentan de forma progresiva, aunque durante el 6to y 11vo mes la agudeza visual binocular es ligeramente mayor a la monocular, al igual que ocurre en los adultos. Según algunas referencias, (Dr. Lopez Alemany, 2005; Chadna, 1991) el desarrollo máximo de la agudeza visual se alcanza entre los 3 y 5 años de edad, siempre que no existan patologías. Sin embargo, otros autores, sostienen que este nivel óptimo se logra entre los 7 y 8 años (Wright, 2006). También es importante destacar que al igual que sucede con la retina, donde su zona periférica se desarrolla más

rápidamente que la zona central, la AV periférica alcanza su desarrollo antes que la central, logrando su madurez hacia el primer año de vida.

El desarrollo de la agudeza visual en los primeros años es fundamental, no solo porque refleja la madurez del sistema visual, sino también porque está muy relacionado con la capacidad de acomodación, que permite al sistema visual mantener una visión clara de objetos a distintas distancias. A medida que la AV mejora, también lo hace la capacidad del ojo para enfocar adecuadamente.

Desarrollo de la Acomodación

La acomodación visual es un proceso monocular que no es congénito y se adquiere gradualmente en la vida postnatal. Este mecanismo se activa como respuesta al estímulo de borrosidad sobre la retina, que ocurre cuando la agudeza visual es insuficiente, como sucede al nacer. La acomodación implica la contracción del músculo ciliar, lo que aumenta la potencia dióptrica del cristalino, permitiendo al ojo enfocar objetos a diferentes distancias. Sin embargo los recién nacidos durante las primeras semanas, no utilizan la acomodación de forma precisa ya que poseen una gran profundidad de foco y por lo que, cambios en la distancia de fijación no provocan aumento de la borrosidad y la respuesta acomodativa es innecesaria. Es decir que la imagen desenfocada en la retina es producto de la interacción del error refractivo, la falta de desarrollo de la retina y la distancia a la cual son vistos los objetos. Los factores que hacen posible que el recién nacido posea dicha profundidad de foco son: el diámetro pupilar pequeño, la inmadurez macular y la corta longitud axial (Borrás, 1998; Camacho, 2009).

A medida que ocurre el desarrollo posnatal, suceden cambios que hacen que estos factores se normalicen y la profundidad de foco disminuya, generando una respuesta acomodativa más precisa que comienza a ser presente durante el primer mes de vida. Se considera que durante la 5ta semana postparto comienza su desarrollo en un ojo y hacia la 7ma para el otro. Se da de forma asimétrica, siendo estable y binocular, alrededor de los 2 meses de vida, coincidiendo con la fijación y con la finalización de las vías motoras y sensoriales (Camacho, 2009). En línea con este desarrollo, diferentes estudios realizados con potenciales evocados y lentes negativas, han demostrado que a las 19 semanas, es decir a los 4 o 5 meses, se logra una respuesta acomodativa comparable a la de un ojo adulto. (Borrás, 1998; Camacho, 2009; Currie y Manny, 1997; Duckman, 2006).

La siguiente tabla muestra los diferentes hallazgos de diversos investigadores sobre el desarrollo de la respuesta acomodativa en el periodo postnatal, dependiendo del estímulo empleado.

Tabla 2.3 *Resumen de estudios sobre el desarrollo de la acomodación.*

INVESTIGADOR	MÉTODO UTILIZADO	RESULTADOS
Haynes y otros (1965)	8 a 100 cm Retinoscopía Dinámica	0 - 1 mes: Respuesta de acomodación promedio fue de 5D a todas las distancias. 1 - 2 meses: Algunos cambios acomodativos en función a la distancia. 2 - 4 meses: Acomodación similar a la de un adulto.
Banks (1980)	1,0 - 0,5 y 0,25 m Retinoscopía Dinámica	< 6 semanas: Algunas variaciones acomodativas con el cambio de distancia. 8 - 9 semanas: Acomodación similar a la de un adulto.
Braddick y otros (1979)	0,75 y 1,5 m Fotorefracción	< 9 días: Enfoque constante a 0,75 m. 2 - 3 meses: Enfoque constante a 1,5 m en el 60 - 70% de los bebés. 6 - 8 meses: Enfoque constante a 1,5 m en todos los bebés.
Brokman (1983)	10 a 50 cm Retinoscopía Dinámica	2 - 12 semanas: Acomodación ≤ 4D. 12 - 16 semanas: Acomodación en incremento ≥ 4D.
Howland y otros (1987)	25 - 100 cm Fotorefracción Dinámica	2 - 9 meses: Incremento poco significativo. 10 meses: Acomodación similar a la de un ojo adulto.

Fuente: Currie, M (1997). "*The Development of Accommodation*" Journal Vision Research Vol. 37, No, 11.

Vía Visual

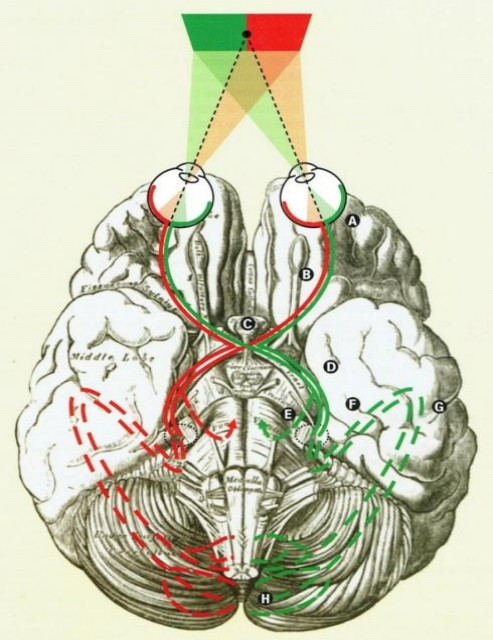
La vía visual está conformada por las estructuras anatómicas encargadas de transmitir, procesar e interpretar la información luminosa que llega a la retina. Esta vía comienza en los fotorreceptores retinianos y finaliza en la corteza visual localizada en el lóbulo occipital.

Luego de la maduración progresiva de la retina, que ya hemos visto, la señal captada por los fotorreceptores es transmitida por medio de las células bipolares a las células ganglionares, cuyos

axones forman el nervio óptico que surge de la parte posterior del ojo y se introduce en el cráneo, donde a la altura del quiasma óptico, sufren una reorganización. Las fibras del nervio óptico provenientes de las mitades nasales de cada retina se cruzan y se unen a las pertenecientes a la mitad temporal del ojo contralateral, mientras que las provenientes de las mitades temporales permanecen de su mismo lado. De esta manera, cada tracto óptico transmite la información de ambas hemirretinas (nasal y temporal). Algunas de estas fibras, van a estructuras que están relacionadas con funciones específicas como los movimientos oculares y el reflejo pupilar de la luz, pero la mayor parte, se dirige hacia los cuerpos geniculados laterales. Desde allí las fibras forman las radiaciones ópticas, quet al.raviesan los lóbulos temporal y parietal, para finalizar proyectándose en la corteza visual primaria (V1) (Hubel, 2000; Martín y Vecilla, 2010). Este patrón de organización garantiza que cada hemisferio cerebral pueda procesar la información visual correspondiente al campo visual opuesto, importante para la integración binocular, la percepción espacial y la coordinación motora.

Una vez comprendida la organización anatómica de la vía visual, abordaremos el desarrollo postnatal del cuerpo geniculado lateral y de la corteza visual, estructuras fundamentales para la maduración funcional del sistema visual.

Figura 2.4 *Vía Visual*



Nota: A: retina, B: nervio óptico, C: quiasma óptico, D: tracto óptico, E: cuerpo geniculado lateral del tálamo, F: radiación óptica de Gratiolet, G: asa geniculotemporal de Mayer, H: corteza visual primaria. *Fuente*: Martín, R. Vecilla, G (2010). *Manual de Optometría.* Madrid. Editorial médica Panamericana.

Desarrollo del Cuerpo Geniculado Lateral (CGL)

El cuerpo geniculado lateral (CGL), es una estructura que se encuentra ubicada en el tálamo y actúa como un centro de procesamiento y transmisión de señales visuales que van desde la retina hacia la corteza visual primaria (V1). Estas señales las recibe a través de las fibras del

nervio óptico, las organiza y luego las envía a las áreas del cerebro responsables de interpretar la visión, a través de las radiaciones ópticas.

Está compuesto por seis capas que al nacer son pequeñas y poco diferenciadas, pero a medida que transcurren los primeros meses de vida, donde la retina comienza su desarrollo y el CGL comienza a experimentar una serie de transformaciones fundamentales para el establecimiento de la visión funcional, las capas comienzan a diferenciarse, adquiriendo funciones específicas. El proceso de desarrollo está estrechamente vinculado con la fijación, es decir si tenemos una fijación central, tendremos una buena agudeza visual que estimula el crecimiento y la maduración del cuerpo geniculado lateral. Estas capas están organizadas de manera retinotópica, es decir, que cada capa recibe información de diferentes tipos de células ganglionares de la retina, y son esenciales para procesar distintos componentes de la percepción visual, como el color, el contraste, el movimiento y la forma.

Cada cuerpo geniculado está conformado por dos sistemas, que forman las 6 capas que lo componen; las capas 1 y 2 pertenecen al *sistema magnocelular* y las capas 3, 4, 5, y 6 al *sistema parvocelular.* Las neuronas que pertenecen a las capas 1 y 2 se caracterizan por ser células grandes que responden al movimiento y contraste, de baja resolución espacial pero alta sensibilidad temporal. La información que procesan es necesaria para la percepción de la dirección y velocidad de los objetos en movimiento. Por otro lado, las neuronas del sistema parvocelular se distinguen por ser células más pequeñas, especializadas en la detección de los detalles finos, los colores con alta resolución espacial, pero con menos sensibilidad temporal (Kandel, 1997). Existe un tercer tipo de células, llamadas células koniocelulares, que se ubican en las láminas que dividen las seis capas principales, que poseen cuerpos celulares muy pequeños y procesan la información sobre visión de ondas cortas del contraste.

Las fibras de ambos sistemas, magnocelular y parvocelular, se unen en una banda ancha, denominada radiaciones ópticas, que transmiten información a las columnas de dominancia ocular presentes en V1 (corteza visual primaria), donde la información proveniente de cada ojo será integrada para ayudar al cerebro a procesar los diferentes aspectos de la visión (Hubel, 2000).

Durante el desarrollo, las fibras del tracto óptico llegan al CGL alrededor de la semana 11 de gestación. En esta etapa, las aferencias del tipo P son las primeras en llegar, inervando las capas centrales, que más adelante se diferenciarán como capas P. Posteriormente, las aferencias del tipo M hacen su aparición y se establecen en las capas laterales.

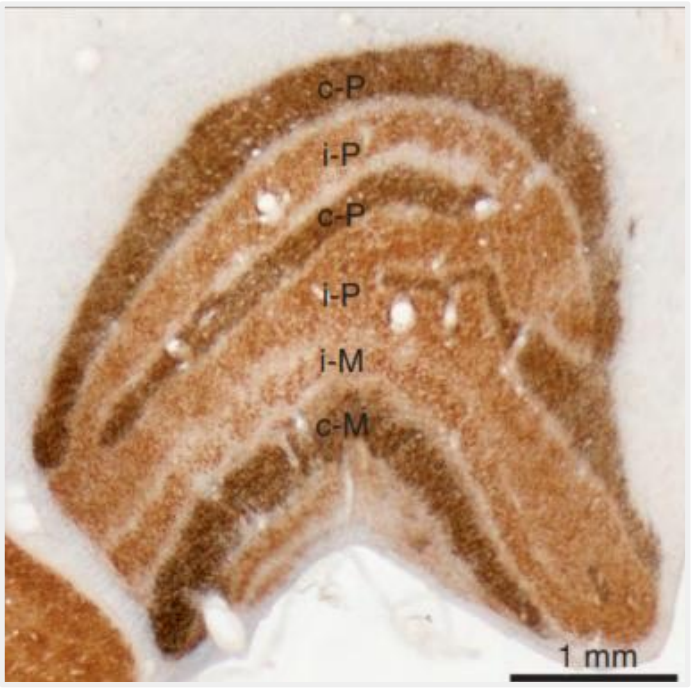
Inicialmente, las fibras del ojo izquierdo y derecho se mezclan en las capas de ambos ojos, pero entre las semanas 14 y 30 se establecen las capas específicas del ojo en el cuerpo geniculado, con una notable reducción del número de fibras (axones de las CGR) que pasan de ser de 3,5 millones a 1 millón aproximadamente, permitiendo una especialización funcional y la eliminación selectiva de conexiones inadecuadas (Taylor, 2005; Borrás, 1998). En otras palabras, una sola célula en el cuerpo geniculado lateral no recibe información de ambos ojos simultáneamente,

sino que cada célula está dedicada exclusivamente al ojo derecho o al izquierdo. Estas células se agrupan en capas separadas, donde cada una recibe señales únicamente de un ojo. Las capas se disponen de forma alternada, permitiendo una organización secuencial de la información ocular. Por ejemplo, en el cuerpo geniculado lateral izquierdo, el orden de las capas de arriba hacia abajo sigue la secuencia: derecho, izquierdo, derecho, izquierdo, izquierdo, derecho. Aún no se comprende la razón por la cual esta secuencia se invierte (Hubel, 2000).

Hacia el sexto mes de vida, ya se encuentran establecidas las columnas de dominancia ocular (Borrás, 1998) que son estructuras simples: casi todas las células de cada CGL reciben información directamente de las fibras del nervio óptico (CGR), y la mayoría de estas células envían axones a la corteza cerebral, por lo que en los cuerpos geniculados solo existe una etapa sináptica. Una vez establecida esta estructura funcional, el CGL continúa su maduración. A medida que el bebé comienza a recibir estimulación visual, se lleva a cabo una refinación progresiva que permite una mayor especificidad en las conexiones retinogeniculadas, generando una óptima transmisión de la información visual. Además, durante los primeros meses de vida, se incrementa la mielinización de las vías visuales, mejorando la velocidad de conducción neuronal. La organización retiniana se vuelve más precisa, y la diferenciación funcional entre las vías magnocelular y parvocelular se afina.

El mayor desarrollo que alcanzan las fibras del sistema Parvocelular se da durante el primer año de vida, mientras que las del sistema Magnocelular lo hacen aproximadamente a los dos años. (Chadna, 1991).

Figura 2.5 Capas *Magnocelular y Parvocelular del CGL*



Nota: CGL de macaco teñido con citocromo de oxidasa. *Fuente:* Taylor, D. Hoyt,c. (2005). *Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. Elsevier Ltd: London and San Francisco.

Desarrollo de la Corteza Visual

En las áreas 17, 18 y 19 de Brodmann, ubicadas en el lóbulo occipital, se localiza la corteza visual, la cual desempeña un papel fundamental durante el desarrollo, ya que es en estas regiones donde se lleva a cabo la función visual.

La información visual procesada en la corteza visual primaria (V1), correspondiente al área 17, se transmite al área 18 o área visual 2 (V2), que rodea casi por completo a la anterior. A su vez, el área 18 proyecta esta información hacia otras regiones visuales especializadas, como el área visual 3 (V3), el área visual 4 (V4) y el área temporal medial (MT), todas involucradas en el procesamiento visual avanzado. (Hubel, 2000).

Desde el nacimiento, las células del CGL se proyectan a la capa 4 de la corteza estriada, donde inicialmente se entremezclan y luego se segregan en columnas de dominancia ocular bajo la influencia de la actividad retiniana y la estimulación visual (Taylor, 2005). En otras palabras, la región cortical experimenta un proceso de maduración estructural y funcional que se extiende durante los primeros meses de vida, donde la interposición vertical de fibras geniculadas permite la formación de columnas de dominancia ocular que representan celularmente a cada ojo. Estas células, al nacer, no están completamente diferenciadas ni organizadas; es a través del estímulo visual que estas columnas comienzan a madurar y a aumentar su tamaño, especialmente la correspondiente al ojo dominante que será aquel con mayor representación cortical, principalmente en el área 17.

Este proceso de organización y maduración cortical demora aproximadamente seis meses y es fundamental para el desarrollo de una visión binocular adecuada.

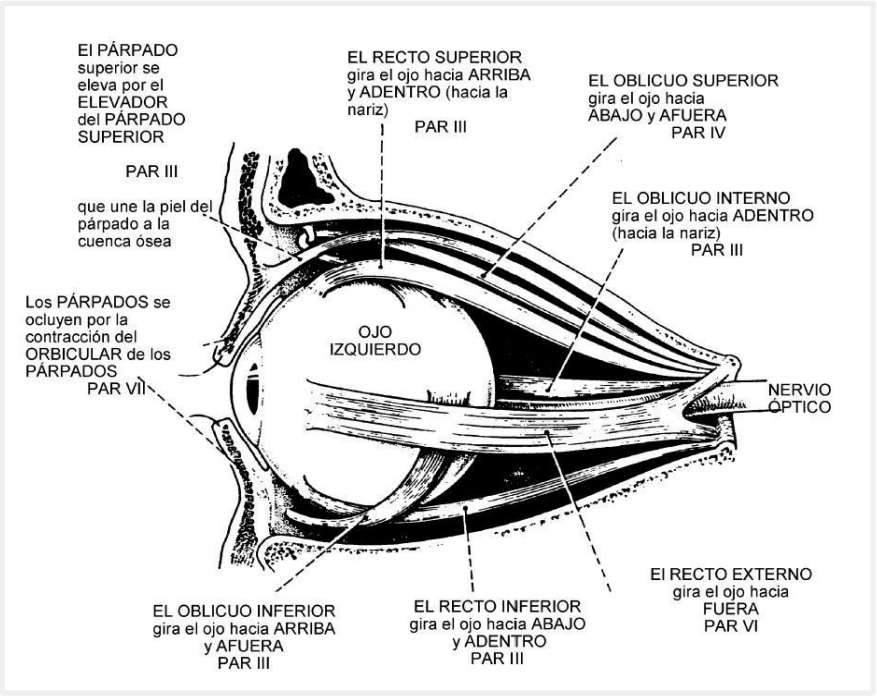
2.2 Mielinización de vías motoras oculares, III, IV, VI nervio

El desarrollo y maduración del sistema visual no depende solamente de la diferenciación macular en la retina y de los cambios en el cuerpo geniculado lateral y la corteza visual, sino que también depende de la mielinización de sus vías motoras, encargadas en el control preciso de los movimientos oculares. Estas vías están constituidas por los nervios oculomotor (III), troclear (IV) y abducens (VI), los cuales se encargan de la inervación de los distintos músculos extraoculares responsables del movimiento del globo ocular, cuyas funciones motoras se describirán brevemente a continuación:

NERVIO OCULOMOTOR (III): inerva a los siguientes músculos extrínsecos: el elevador del párpado superior, el recto superior, el recto medial, el recto inferior y el oblicuo inferior. Es también responsable de la inervación de músculos intrínsecos como el constrictor de la pupila del iris y los músculos ciliares. Es decir que es responsable de levantar el párpado superior, girar el ojo hacia arriba, hacia abajo y medialmente, de contraer la pupila y acomodar el ojo.

- NERVIO TROCLEAR (IV): inerva al oblicuo superior ayudando al ojo a girar hacia abajo y lateralmente.
- NERVIO ABDUCENS (VI): inerva al recto lateral, haciendo girar al globo ocular de manera lateral (Rowe, 2012; Snellen, 2010).

Figura 2.6 Músculos *extraoculares y movimiento del ojo*



Fuente: Urtubia Vicario, C. (1999). *Neurobiología de la visión*. Edicions UPC.

Para que estos nervios funcionen correctamente, es necesario que durante el desarrollo completen su proceso de mielinización, que consiste en recubrir las fibras nerviosas con una sustancia llamada mielina. Son los oligodendrocitos (células de sostén) los responsables de formar esta vaina en el sistema nervioso central. Su presencia proporciona una capa aislante, que mejora la velocidad y eficiencia en la transmisión de señales. La mielinización comienza antes del nacimiento y continúa durante el primer año postnatal, iniciando en el tronco encefálico y avanzando de forma centrípeta hacia el nervio óptico (Snellen, 2010).

En estudios realizados se pudo observar la presencia de láminas características de mielina alrededor de unas pocas fibras del tracto óptico, durante el periodo gestacional tardío, sobre la semana 32. Sin embargo, es luego del nacimiento que las vías comienzan a mielinizarse, completando su desarrollo durante el 3er y 4to mes de vida aproximadamente, y sucede gracias a los estímulos que recibe el globo ocular. Es aquí donde se considera que se da la máxima mielinización a lo largo de toda la vida, ya que a los 7 meses todas las fibras de las vías subcorticales se encuentran prácticamente mielinizadas. Para el caso de las áreas extraestriadas, este proceso continúa aumentado rápidamente durante dos años y se extiende de forma gradual a partir de entonces, hasta mediados de la infancia. (Margoon, 1981; Chadna 1991; Duckman, 2006). A

medida que avanza este proceso, los movimientos oculares se vuelven más rápidos, coordinados y precisos, fundamental para el adecuado desarrollo de la visión binocular.

Desarrollo de la Visión Binocular (VB)

La visión binocular es la condición en la que ambos ojos ven una porción común del espacio visual y su desarrollo es el resultado de los cambios estructurales y funcionales quet al.raviesa el sistema visual en las primeras etapas de la vida. Esto quiere decir que a medida que maduran las estructuras oculares, los músculos extraoculares, la retina y la vía óptica, se habilita la posibilidad de que ambos ojos trabajen de forma coordinada con el objetivo de integrar las imágenes provenientes de cada ojo en una sola percepción unificada y con profundidad.

Para que el desarrollo de la visión binocular ocurra de manera adecuada, no solo es necesario que ambos ojos reciban imágenes retinianas enfocadas y nítidas, sino que también exista una correcta alineación motora. Esta coordinación permite una precisa fusión bifoveal dando lugar a la estereopsis.

Se ha comprobado que la visión binocular y la fusión están presentes entre los 1.5 y los 2 meses de edad, mientras que la estereopsis se desarrolla posteriormente, entre los 3 y los 6 meses de edad. (Martín y Vecilla, 2000; Duckman, 2006; Wright, 2006).

Movimientos oculares y Estereopsis

El sistema oculomotor está inmaduro al nacer, provocando que el alineamiento de los ojos sea muy variable durante las primeras semanas de vida, donde es frecuente encontrar estrabismo y mala coordinación motora (Martín y Vecilla, 2010).

Los recién nacidos presentan movimientos de fijación sacádicos que se van perfeccionando durante la infancia; son los únicos movimientos congénitos, controlados por los lóbulos frontales, que son cortos, rápidos y voluntarios y que permiten alinear rápidamente la fóvea con el objeto a visualizar. Con el establecimiento de la fijación, que ocurre en gran parte por estos movimientos entre el 2do y 3er mes de vida, comienza también el desarrollo de los otros movimientos oculares: los vergenciales (convergencia y divergencia), y los de seguimiento. Alrededor del 70% de los bebés entre el 3er y 4to mes son capaces de realizar movimientos de convergencia y divergencia con bastante precisión. Hacia los 6 meses, la mayoría muestran reflejos fusionales, coincidiendo con el periodo de máxima mielinización de las vías motoras. Esta capacidad de converger sigue desarrollándose hasta los 18 meses de vida aproximadamente, siendo la última función motora en completarse (Dr. López Alemany, 2005).

Cuando las imágenes de ambos ojos se fusionan de manera continua, se da lugar al desarrollo de la estereopsis. La mayoría de los bebés muestran una primera evidencia entre los 3 y 6 meses de edad, con un promedio de inicio alrededor de los 4 meses. Antes de este periodo, los

recién nacidos solo realizan superposición de imágenes, dado que las células corticales aún son inmaduras. A medida que completan su desarrollo, se vuelven capaces de analizar las disparidades de fijación entre las imágenes provenientes de cada ojo, permitiendo la percepción precisa de la profundidad (Moguel y Orozco, 2007). Aunque a los 6 meses los valores de estereopsis son comparables a los de un adulto (60” de arco), es a los 24 meses cuando se alcanza la máxima madurez (Taylor, 2005).

Conclusión

A modo de conclusión, el desarrollo de la visión es un proceso complejo que comienza desde el nacimiento y continúa durante los primeros años de vida. El periodo crítico para este desarrollo se extiende hasta los 6 años, cuando se establece la fijación visual y se fortalece la capacidad de usar ambos ojos de manera coordinada. Durante este tiempo, la retina y las vías visuales maduran, permitiendo que el cerebro procese la información de manera adecuada. La estimulación visual temprana y el desarrollo de las conexiones nerviosas entre los ojos y la corteza visual son importantes para lograr una visión binocular eficiente, permitiendo una mejor percepción del espacio y el desarrollo de habilidades motrices. En resumen, la correcta maduración de las vías visuales en este periodo es esencial para que el niño tenga una visión clara y funcional, ya que cualquier alteración en esta etapa podría traer alteraciones en la visión binocular, lo que afectaría a la percepción visual y las habilidades relacionadas.

Bibliografía

Amber M. Barnaby, Ronald M. Hansen, Anne Moskowitz, Anne B. Fulton; Development of Scotopic Visual Thresholds in Retinopathy of Prematurity. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2007;48(10):4854-4860. https://doi.org/10.1167/iovs.07-0406.

Benjamin, W. (2006). *Borish's Clinical Refraction* (2da Ed). Elsevier.

Borrás y Col (1998) *Visión Binocular diagnóstico y tratamiento*. Edicions UPC: España.

Camacho, M (2009). *Terapia y entrenamiento visual: una visión integral*. Universidad de la Salle: Bogotá Colombia.

Carlson B. (2014) *Embriología humana y biología del desarrollo* (5ta Ed.) Elsevier Saunders. Barcelona

Currie, M (1997). *The Development of Accommodation* Journal Vision Research Vol. 37, No, 11.

Chandna A. Natural history of the development of visual acuity in infants. Eye (Lond). 1991;5 (Pt 1):20-6. doi: 10.1038/eye.1991.4. PMID: 2060665.

Dr. Lopez Alemany, A (2005). *Optometría Pediátrica*. Editorial Ulleye. Valencia.

Duckman, R. H. (2006). *Visual Development, Diagnosis, and Treatment of the Pediatric Patient.* Lipponcott Williams & Wilkins.

Flores Vladimir (2015) Embriología Humana. Bases moleculares y celulares de la histogénesis, la morfogénesis y las alteraciones del desarrollo (1era Ed.) Editorial Médica Panamericana.

Gil del Rio, E (1977). *Problemas visuales en la infancia*. Editorial JIMS. Barcelona.

Gonzalez Ruiz, L. E., & Tamayo Laverde, L. M. (1982). *Aspectos oculares en prematuros y recién nacidos a término.* Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/optometria/1292

Guerrero Vargas,J. (2006). *Optometría Clínica*. Universidad Santo Tomás: Bucaramanga, Colombia.

Hansen, R.M., Moskowitz, A., Akula, J.D., Fulton, A.B. (2016) *The neural retina in retinopathy of prematurity, Progress in Retinal and Eye Research*, doi: 10.1016/ j.preteyeres.2016.09.004.

Hubel, D. H., (1960), Single unit activity in lateral geniculate body and optic tract of unrestrained cats. *The Journal of Physiology*, 150 doi: 10.1113/jphysiol.1960.sp006375.

Hubel, D. (2000). *Ojo, Cerebro y Visión*. Universidad de Murcia Servicio de Publicaciones: Murcia.

Juárez S.,Castillo A. (2012) *Retina y Vítreo* (2da ed). El Manual Moderno. México.

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (1997). *Principles of Neural Science* (4th ed.). McGraw-Hill.

Magoon EH , Robb RM. *Desarrollo de la mielina en el nervio y el tracto óptico humano* : Un estudio con microscopio óptico y electrónico . *Arch Ophthalmol.* 1981;99(4):655–659. doi:10.1001/archopht.1981.03930010655011.

Martín, R. Vecilla, G (2010). *Manual de Optometría.* Madrid. Editorial médica Panamericana.

Merchán Price, M. S., Acosta Yepes, N. F., Gonzales Rodríguez, M. L., & Cortés Rodríguez, D. C. (2010). *Agudeza visual de Snellen versus frecuencia espacial del test de mirada preferencial*. *Ciencia Y Tecnología Para La Salud Visual Y Ocular*, *8*(2), 117-127. https://doi.org/10.19052/sv.811

Merchán Price, M. S., (2012) *Pautas de corrección de defectos refractivos en niños.* Optometría y oftalmología. 10. https://ciencia.lasalle.edu.co/edunisalle_optometria-oftalmologia/10 .

Merchán, S. Merchán, G. Dueñas, M (2014). *Influencia de la prematuridad en el proceso de emetropización*. Revista de Pediatría Diciembre 2014, Vol 47, No. 4, PP 83-89.

Moguel-Ancheita, S. y Orozco-Gómez, LP (2007). *Disfuncionalidad neuronal y psicomotora como resultado del retraso en el tratamiento de la ambliopía*. *Cirugía y Cirujanos , 75* (6), 481-489.

Rojas Juarez, S. Y Saucedo Castillo, A. (2012) *Retina y Vítreo*. Editorial Manual Moderno. México

Rowe, J. (2012). *Clinical Orthoptics*. Wiley – Blackwell: Liverpool.

Snell,R.S. (2010). *Clinical Neuroanatomy* (7ma. Ed) Wolters Kluwer-Lipponcott Williams & Wilkins.

Taylor, D. Hoyt,c. (2005). *Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. Elsevier Ltd: London and San Francisco.

Urtubia Vicario, C. (1999). *Neurobiología de la visión*. Edicions UPC.

Wright K. W., Spiegel P. H., Thompson L. S. (2006). *Handbook of pediatric strabismus and amblyopia* (2da Ed.) Springer.