



INTERVALO FOTOCROMÁTICO, CAMBIO DE PURKINJE, ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD

AUTOR

Thomas Salmon: Northeastern State University, EEUU

PAR REVISOR

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, EEUU

ESTE CAPÍTULO INCLUIRÁ UNA REVISIÓN DE:

- Fotopigmentos de los conos
- Intervalo fotocromático
- Cambio de purkinje
- Adaptación a la oscuridad

REVISIÓN

El sistema óptico del ojo, incluyendo sus dos lentes, la córnea y el cristalino, empieza el procesamiento visual formando una imagen sobre la retina. La retina debe entonces transformar dicha imagen en señales neuronales que llegan al cerebro para ser analizadas y procesadas. Un paso importante en el procesamiento visual es la conversión de estímulos ópticos a señales neuronales (impulsos electrofisiológicos). Este proceso, conocido como **fototransducción**, ocurre en los segmentos externos del fotorreceptor y comienza cuando una molécula de fotopigmento captura un fotón de luz.

En el caso de los bastones (sistema escotópico), el fotopigmento es la **rodopsina** (púrpura visual). Una molécula de rodopsina puede absorber un fotón de luz visible, pero, su probabilidad de capturar un fotón varía con la longitud de onda. La luz capturada se captura de manera más eficiente en una longitud de 507nm, porque un fotón de dicha longitud de onda “encaja” de mejor manera con una molécula de rodopsina.

Note que una vez que un fotón es absorbido, la respuesta del sistema visual es la misma, sin importar la longitud de onda. Este es el principio de *univariancia*. Aunque, por ejemplo, la luz de 580 nm de longitud tiene una menor probabilidad de absorberse, puede ser absorbida igual que una luz de 507nm si se aumenta la intensidad. Esto se ilustró en la figura 7-1 del capítulo 7.

REVISIÓN (CONT.)

Ya se discutieron algunas propiedades de la rodopsina, como su espectro de absorción y transmisión de la luz. También se discutió acerca de la sensibilidad espectral del sistema escotópico y se resaltó que su curva se ve similar a la de la absorción de la rodopsina en diferentes longitudes de onda. Recuerde que el espectro de umbral de la rodopsina es el inverso del espectro de sensibilidad de la misma (Fig 8-1)



Figuae 8-1: Gráficas que podrían representar las funciones espectrales de la rodopsina para la transmisión, absorción, umbral o sensibilidad. ¿Qué gráfica representa determinada función?

FOTOPIGMENTOS DE LOS CONOS

Existen tres tipos de conos, cada uno contiene un fotopigmento diferente al de la rodopsina. Sus diferencias se encuentran en su espectro de absorción, como se muestra en la figura 8.2. Según su espectro de absorción característico los conos se dividen en S (longitud de onda corta), M (longitud de onda media) o L (longitud de onda larga) como se resume en la tabla 8.1

Comparados con los conos L y M, los conos S son muchos más escasos, menos sensibles a la luz y no se encuentran en la fóvea.

Aunque los tres tipos de conos solían conocerse como “azul”, verde o rojo, actualmente se sabe que es un error llamarlos así. La denominación por colores solo describe el pico de sus espectros de absorción. Note que todos absorben la luz en diferentes rangos de longitudes de onda. La presencia de tres tipos de fotopigmentos nos permite discriminar diferentes colores.

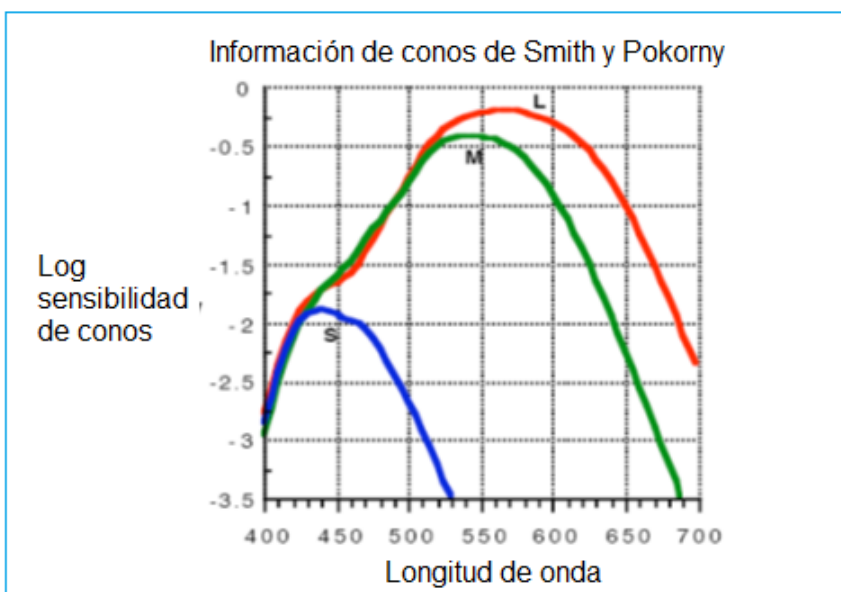


Figura 8-2: Espectro de absorción para los fotopigmentos en los conos S, M y L.

FOTOPIGMENTOS DE LOS CONOS (CONT.)

Tabla 8-1: Fotopigmentos de los conos

TIPO DE CONO	FOTOPIGMENTO	RANGO DE LONGITUD DE ONDA	PICO DE LONGITUD DE ONDA (NM)
Cono S ('cono azul')	Cianolabe	corta	430
Cono M ('cono verde')	Clorolabe	mediana	535
Cono L ('cono rojo')	Eritrolabe	Larga	565

Si se evalúa la sensibilidad del sistema fotópico para captar la luz a diferentes longitudes de onda, se puede graficar la información como una función que se parecería mucho a la curva de $V(\lambda)$ (Schwartz Fig. 3-5 B). Esta función está formada principalmente por la combinación del espectro de absorción de los conos M y L. Los conos S contribuyen muy poco a la función de luminosidad fotópica y su contribución es variable, dependiendo de las condiciones del examen.

INTERVALO FOTOCROMÁTICO

Cuando las curvas de sensibilidad espectral tanto para los bastones (escotópico) como para los conos (fotópico) se grafican en una misma escala, se obtiene un gráfico como el de la figura 8-3, o la figura 3.6 de Schwartz. Note que para la mayoría de longitudes de onda los bastones son más sensibles que los conos y el pico de los bastones está cerca a los 507nm, mientras que el pico de los conos está cerca a los 555nm. En longitudes de onda larga (porción roja) la sensibilidad de los bastones y a los 650nm, es esencialmente igual a la de los conos.

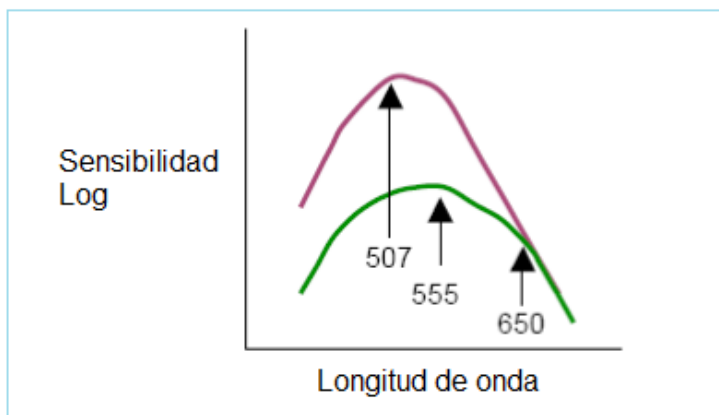


Figura 8-3: Comparación de las funciones de sensibilidad fotópicas y escotópicas.

Estas curvas pueden determinarse con el siguiente procedimiento experimental:

- Adaptar el paciente a la oscuridad
- Los conos y bastones se habrán regenerado en su totalidad y tendrán una sensibilidad máxima
- Iniciar con una luz monocromática (una sola longitud de onda) de muy baja intensidad (Sub-umbral)
- Aumentar la radiancia hasta que la luz pueda detectarse. Esto medirá el umbral escotópico (bastón) para esa longitud de onda.
- Continúe aumentando la radiancia hasta que el paciente pueda detectar el color de esa luz. En este nivel los conos están iniciando a trabajar, por tanto esto indica la detección del color y el umbral para el sistema de conos.
- Repita este procedimiento para todas las otras longitudes de onda del espectro visible.

La diferencia entre la sensibilidad (o umbral) para el sistema de bastones y conos en cada longitud de onda se conoce con el nombre de **intervalo fotocromático**. Esto se representa en un gráfico como *la distancia vertical entre dos curvas*. Note que el intervalo fotocromático es mayor para longitudes de onda corta pero esencialmente cero para longitudes de onda larga.

CAMBIO DE PURKINJE

Las funciones sensibilidad espectral fotópica y escotópica se basan en las medidas de los *umbrales* lumínicos para ambos sistemas. Estas curvas también ayudan a predecir el brillo relativo de diferentes longitudes de onda a *niveles supraumbrales de luz*. Si, por ejemplo se estuviera observando una flor verde-amarilla (555nm) y una flor verde-azul (505nm), que reflejan una radiancia igual, la flor amarilla parecería ser más brillante durante el día. En la noche, a medida que aumenta la oscuridad y el ojo hace su transición hacia la visión escotópica, la flor azul parecería verse más brillante que la flor amarilla. El aumento relativo en el brillo para objetos verdes y azules, a medida que el ojo se adapta a bajos niveles de luz, se conoce con el nombre de **cambio de purkinje o fenómeno de purkinje**. Esto se genera por el cambio en el pico de la sensibilidad desde 555nm a 507nm a medida que el ojo cambia de la visión fotópica a la escotópica. El cambio de purkinje coincide con la separación horizontal de los dos picos que se muestran en la Figura 8-3, ó en la Fig 3-6 de Schwartz. Esto se evidencia por ejemplo con las luces de los carros de policía. Algunos tienen luz roja y azul. La luz roja hace que el carro sea visible durante el día, mientras que la luz azul lo hace más visible durante la noche.

ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD

Una vez blanqueados, los bastones y los conos se recuperan en diferente medida. La vida media de los bastones es de aproximadamente 5 minutos mientras que la de los conos es de 1.5 minutos. Si se blanquea totalmente un fotopigmento bastón o un fotopigmento cono exponiendo a un sujeto a una luz muy brillante (como una BIO), y luego se evalúa su *umbral de detección* para una luz tenue en un periodo de tiempo, a medida que su visión se empieza a recuperar, se estará midiendo su función de adaptación a la oscuridad. La información puede graficarse en una curva tal y como la que se muestra en la figura 3-9 de Schwartz. Esta gráfica es para un estímulo grande en una longitud de onda de 420nm.

Características importantes de la curva de adaptación a la oscuridad con el adaptómetro clásico de Goldmann-Weekers:

- Disminución continua en el umbral (sensibilidad aumentada) por encima de ~ 40 minutos
- Disminución de todo el umbral (Sensibilidad aumenta) alrededor de 5 unidades log (100,000 pliegues)
- La curva alcanza un plateau después de aproximadamente 5 minutos en la oscuridad
- La pendiente cae abruptamente nuevamente luego de 10 minutos
- El cambio abrupto después de el primer plateau se conoce con el nombre de ruptura bastón-cono.
- La curva cae continuamente en un segundo plateau alrededor de 30-40 minutos

La vida media para la recuperación de los conos es más corta que para los bastones, por tanto la mejoría rápida en la sensibilidad (disminución en el umbral) en los primeros 10 minutos se debe a la recuperación de los conos. Durante los primeros diez minutos, la mayoría de los bastones no se han recuperado aun a tal punto que son más sensibles que los conos. Esto corresponde a la primera sección de la curva de adaptación a la oscuridad. A esto le sigue el plateau, que indica el nivel de luz en el que el umbral del cono se detiene, mejorando significativamente.

En la ruptura bastón-cono, suficiente tiempo ha transcurrido para que la sensibilidad del bastón supere la de los conos (su umbral se vuelve menor al de los conos). Con el tiempo, los bastones recuperan continuamente más y más sensibilidad y el umbral continua disminuyendo hasta que los bastones logran su menor umbral (sensibilidad máxima), y la función llega al plateau final.

ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD EN DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA.

En los gráficos de adaptación a la oscuridad, como los que se discutieron anteriormente, la distancia vertical entre los picos de los conos y bastones se correlaciona con el *intervalo fotocromático*. En el ejemplo que se muestra en Schwartz, 2004, Fig 3-9, se consideró la función de adaptación a la oscuridad para un estímulo con una longitud de onda de 420nm.

Devolviéndose a la figura 8.3, ¿cómo se compara el intervalo fotocromático para una longitud de onda corta, como 420 nm con uno a una longitud de onda larga como 650nm?

Si en lugar de 420nm, el estímulo tuviera una longitud de 650nm, la curva de adaptación se vería como la que se muestra en Schwartz Fig. 3-10. La primera porción de la curva es similar a la anterior, pero, no existe la ruptura bastón-cono y no hay disminución en el umbral por debajo del plateau del cono.

ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD (CONT.)

Q. ¿Por qué?

A. Las figuras 8.3 y 3.6 de Schwartz muestran que para longitudes de onda largas, como 650nm, el intervalo fotocromático es cero y los bastones no son más sensibles que los conos. Por tanto, una vez que los conos han alcanzado su plateau (umbral máximo), los bastones también están en su umbral máximo. El umbral no cae por debajo del plateau de los conos ya que los bastones no son más sensibles que los conos para esa longitud de onda, ni siquiera si se espera por un tiempo prolongado.

Principio general: en la curva de adaptación a la oscuridad, la ruptura bastón-cono es más pronunciada y la distancia entre los plateaus de los conos y bastones es mayor, para longitudes de onda en las que el intervalo fotocromático es mayor.

La relación entre las funciones de umbral de los conos y bastones y las curvas de adaptación a la oscuridad, se muestran en Schwartz, 2004 Fig 3-11, remítase a la figura de Schwartz y al dibujo de la función de adaptación a la oscuridad en la figura 8.4, para un estímulo grande (punto de 5-10° de diámetro) con una longitud de onda de 465nm. La curva de adaptación a la oscuridad puede predecirse con la siguiente lógica:

- Localizar los umbrales de detección a la luz de los conos y bastones para una longitud de onda de 465nm en la gráfica de la derecha.
- Esto le dará el valor y para los plateaus de los conos y los bastones. En esta longitud de onda la separación entre los umbrales absolutos de los conos y bastones es grande (intervalo fotocromático alto)
- Dibuje la ruptura bastón-cono al pasar 10 minutos en la curva de la izquierda
- Dibuje la porción del cono hacia la izquierda de la ruptura bastón cono, con un descenso rápido, que se nivea justo antes de la ruptura bastón-cono.
- Dibuje el plateau de los bastones luego de 30 minutos.
- Conecte la ruptura bastón-cono con el plateau de los bastones usando una gráfica de descenso rápido y luego una transición gradual en el plateau del bastón.

Siga la misma secuencia lógica resumida anteriormente para dibujar la curva de adaptación a la oscuridad para un estímulo grande con una longitud de onda de 610nm. Note que la curva de adaptación a la oscuridad dibujada en la Fig 3-10 de Schwartz difiere bastante con la de 465 nm:

- El plateau de los conos es más bajo
- El plateau de los bastones es más alto
- La ruptura bastón-cono está más hacia la derecha al pasar 30 minutos
- El intervalo fotocromático es pequeño

Debe entenderse porque cada característica de las dos curvas (465 vs 610) es diferente.

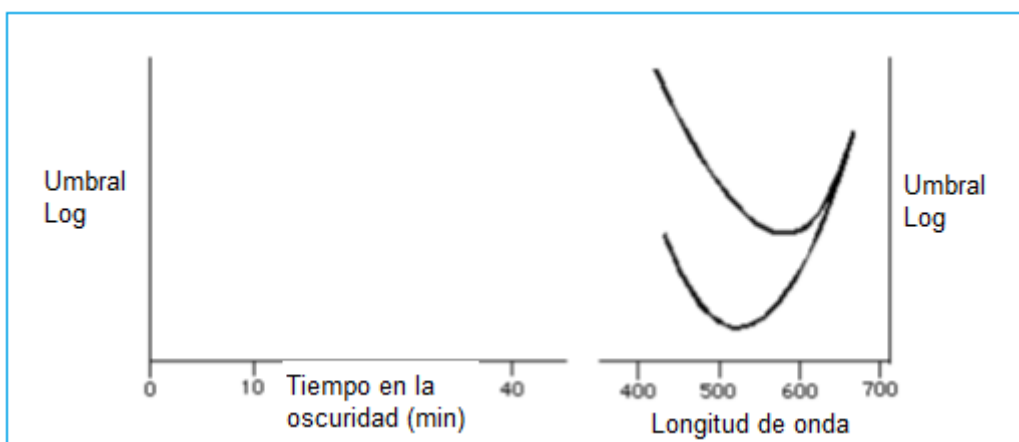


Figura 8-4: Complete esta figura para mostrar la función de adaptación a la oscuridad para un estímulo con una longitud de onda de 465nm y luego de 610nm.

ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD (CONT.)

En estos ejemplos, el intervalo fotocromático puede verse ya sea en las funciones espectrales de umbral o en las funciones de adaptación de umbral. Las funciones espectrales de umbral muestran los umbrales para los conos y bastones después de una adaptación completa a la oscuridad para cada longitud de onda (La abscisa muestra el tiempo) para una longitud de onda. La tabla 8.2 resume la relación entre el intervalo fotocromático y la adaptación a la oscuridad.

Tabla 8-2: Efecto del intervalo fotocromático en la función de adaptación a la oscuridad.

EJEMPLO λ (NM)	INTERVALO FOTOCROMÁTICO	UMBRAL DEL CONO	UMBRAL DEL BASTÓN	RUPTURA BASTON-CONO	DIFERENCIA EN LAS ALTURAS DE LOS PLATEAU
< 560	Grande	alto	Por debajo al de los conos	temprana	Grande
560-600	pequeño	minimo	Por debajo al de los conos	tardía	pequeña
> 650	cero	medio	Igual al de los conos	ninguna	ninguna

ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD Y TAMAÑO /UBICACIÓN DEL ESTÍMULO

Es posible ajustar el tamaño del estímulo y su localización para incluir o excluir a los bastones. Por ejemplo un objeto de fijación central grande (de más de 2° de diámetro) invocaría tanto la fovea como la zona cercana rica en bastones de la retina. Por otro lado, un estímulo muy pequeño (2° de diámetro o menos), fijado centralmente, limitaría la respuesta a solo los fotorreceptores cono.

P. ¿Cómo se vería la curva de adaptación a la oscuridad con este tipo de estímulos?(ver Schwartz, 2004 Fig. 3-12.)

MECANISMO DE LA ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD

Previamente se comentó que la sensibilidad espectral del sistema escotópico (Ver figura 8.1 o Schwartz, 2004 Fig 3-4 B) iguala el espectro de absorción de la rodopsina (Ver Fig 8.1 or Schwartz, 2004 Fig. 3-3 C). Se asumió que la sensibilidad de los bastones para diferentes longitudes de onda se basa en mayor parte a la capacidad de una molécula de rodopsina para capturar un fotón de esa longitud de onda. De manera similar se asumió que las características de absorción de los fotopigmentos L y M (clorolabe y eritrolabe) determinan la función de sensibilidad espectral (Sensibilidad del sistema de conos a diferentes longitudes de onda; ver Fig 8.2 o Schwartz Fig. 3-5)

Continuando con esta lógica, se podría asumir que la adaptación a la oscuridad puede explicarse por la regeneración del fotopigmento que se blanqueo inicialmente, hacia su estado normal. Esta hipótesis es conocida como la **explicación fotoquímica** de la adaptación a la oscuridad. Si esto es verdad, se esperaría que al blanquear el 50% de la rodopsina se duplique el umbral de un bastón (Ver Schwartz Fig. 3-13). De hecho, al blanquear el 50% de la rodopsina se aumenta el umbral 10 billones de veces!, por tanto, a pesar de que la regeneración del fotopigmento es necesaria para la adaptación a la oscuridad, no queda explicado totalmente el por qué del proceso.

La Fig. 3-14 de Schwartz, 2004 muestra resultados experimentales que soportan esta teoría con una *monocrómata*. Esto es una persona con una enfermedad retiniana que lo deja solo con bastones en su retina (ningún bastón). Al evaluar la adaptación a la oscuridad en un monocrómata de bastones, se encontró que el umbral de los bastones se encuentra justo antes de donde se vería normalmente en la ruptura bastón-cono.

La figura muestra dos curvas de adaptación a la oscuridad, pero, también note que existen dos escalas verticales (ordinadas). La escala de la derecha muestra el porcentaje de rodopsina en su estado blanqueado y la de la izquierda muestra el log del umbral. Los círculos muestran información para el monocrómata de bastones y para comparar, también se muestra la curva de adaptación a la oscuridad para una retina normal.

Durante este experimento, el paciente se adapta a la oscuridad y se mide su umbral de detección de la luz como es habitual. Además, se monitorea la cantidad de rodopsina que se blanquea en su retina. La cantidad de rodopsina que se blanquea puede determinarse mediante una técnica llamada **densitometría retiniana**. La técnica consiste en

iluminar la retina con una cantidad de luz determinada y la cantidad de luz que se refleja se mide para determinar la cantidad que fue absorbida por los fotopigmentos.

Se inicia (tiempo=0) deslumbrando la retina con una luz brillante, blanqueando el 100% de la rodopsina (ordinada derecha). La ordinada de la izquierda muestra que el umbral es muy alto (ojo no sensible). Con el tiempo, la rodopsina se regenera y vuelve a su estado normal. Con la regeneración, el porcentaje de pigmento blanqueado disminuye y el umbral también disminuye. (En otras palabras, el porcentaje de pigmento que vuelve a su estado normal es mayor y la sensibilidad, por tanto, también aumenta. En este experimento nos interesa ver como cambia el umbral en comparación con el porcentaje de pigmento blanqueado (comparando las ordinadas de la derecha y la izquierda)

Note como disminuyen de rápido los valores del umbral. Cuando la rodopsina se recupera en un 50% (50% de pigmento en estado normal), el umbral ha disminuido en 10 unidades logarítmicas aproximadamente (10 000 000 de veces). Ya que la mitad de la rodopsina no conlleva a dividir el umbral en una sola mitad, la adaptación a la oscuridad no puede explicarse únicamente por la hipótesis fotoquímica. Deben existir otros mecanismos que permitan al ojo mejorar su sensibilidad mucho más de lo que logra explicarse con regeneración de los fotopigmentos.

También resulta interesante el ver que luego de 15 minutos de recuperación (tiempo que le toma a una persona normal alcanzar la ruptura bastón.cono) cerca del 90% de la rodopsina se regenera, y el umbral a disminuido a 16 unidades logarítmicas

Una muy pequeña cantidad de rodopsina blanqueada genera un aumento muy grande en el umbral (reducción de la sensibilidad) Esto también se ilustra en la figura 8.5. Note que la ordinada y la abscisa se utilizan aquí. La relación lineal entre el porcentaje de fotopigmento blanqueado y el logaritmo del umbral se describe con la siguiente **ecuación de Dowling- Rushton**:

$$\text{Log} \frac{I_t}{I_0} = KP$$

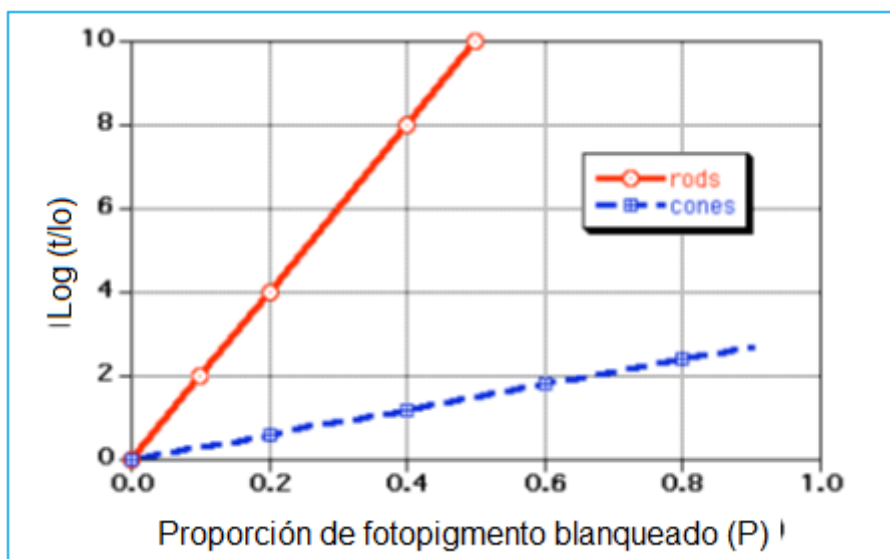


Figura 8-5: La relación entre el umbral y el porcentaje de fotopigmento blanqueado se describe con la ecuación de Dowling-Rushton, en la que I_t representa la intensidad del umbral, I_0 es la intensidad del umbral luego de una adaptación a la oscuridad completa, P es el porcentaje de pigmento blanqueado y K es una constante (20 para los bastones, 3 para los conos)

En resumen, durante la adaptación a la oscuridad del ojo el umbral se recupera mucho más rápido de lo que puede explicarse con la regeneración de fotopigmentos. Otros factores más complejos, como el procesamiento neuronal, deben estar involucrados.

EXAMEN CLÍNICO DE LA ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD – TEST DEL FOTOESTRÉS

La adaptación a la oscuridad es el proceso mediante el cual la visión recupera su sensibilidad al cambiar de un ambiente iluminado a uno oscuro. Al deslumbrar la retina con una luz brillante y luego evaluar el umbral de detección lumínica 30 o 40 minutos después, se puede medir el proceso completo de adaptación a la oscuridad. El fotoestrés puede no concebirse como un test de adaptación a la oscuridad, pero, si evalúa la primera parte del proceso, es decir,

la recuperación luego del blanqueamiento a los fotorreceptores. Los fotopigmentos de los conos se regeneran rápidamente, por tanto la visión foveal se recupera rápidamente luego de que una luz brillante se apaga.

- P. ¿ Por qué cree que un tiempo de recuperación largo luego de un fotoestrés indica una enfermedad macular en lugar de una del nervio óptico?**
- R. Una recuperación lenta tras un deslumbramiento (primera parte de la adaptación a la oscuridad) se debe probablemente a una regeneración inadecuada de los fotopigmentos, que están contenidos en los fotorreceptores, en este caso los conos. Un tiempo prolongado de recuperación tras un fotoestrés indica, por lo tanto, un problema en los conos más no con el nervio óptico. Por lo tanto es un diagnóstico de maculopatía.**

A continuación se presenta un resumen del test de fotoestrés:

- Medir la AV mejor corregida de cada ojo
- Pida al paciente que mire la luz BIO (oftalmoscopio indirecto) por 10 segundos, a una distancia de 10 cm. Esto blanqueará sus fotopigmentos. Apague la luz y comience a tomar el tiempo con un cronómetro.
- Permita que el paciente vuelva a fijar la cartilla de AV y pídale que fije una línea menor a su mejor AV.
- Anote el tiempo que le toma al paciente leer toda la línea. Asegúrese que que lea la línea haciendo uso de su visión foveal (a través del punto deslumbrado) en lugar de leer con la visión perifoveal. Repita el proceso para el otro ojo
- Compare el tiempo de recuperación para ambos ojos; debe ser similar.

Ambos ojos deben recuperarse totalmente en un tiempo de 2 minutos. Muchos pacientes con visión normal se recuperarán en menos de 30 segundos. Cualquier asimetría significativa puede indicar alguna anomalía macular en el ojo con menor tiempo de recuperación.

- P. Algunas veces se necesita verificar la refracción del paciente, bajo condiciones ciclopégicas, al terminar un examen BIO. ¿ Cuánto tiempo se necesita esperar después del BIO antes de realizar una refracción subjetiva?**
- P. ¿ Cuánto tiempo necesita esperar para hacer retinoscopia despues de realizar el test?**

REFERENCIAS/LECTURAS SELECCIONADAS

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004