
Análisis del uso de la Potencia Óptica de Lentes Electrónicos Controlados por Señales biológicas: Un Enfoque Cuantitativo de Fatiga Ocular

William Gómez Roa
wa.gomez@javeriana.edu.co
Bioingeniería y Ciencia de Datos

El presente diseño experimental tiene como objetivo evaluar la influencia del brillo de una pantalla digital y del tiempo de visualización sobre la fatiga visual digital (FVD). El problema específico que se busca abordar es determinar el efecto de estos factores sobre la variable respuesta, la cual está relacionada con la FVD.

La fatiga visual digital, al ser una medida con un componente altamente subjetivo debido a factores psicológicos, puede ser considerada como una **variable latente**, es decir, una variable que no puede medirse directamente. Por este motivo, utilizamos variables cuantitativas para obtener una aproximación objetiva de la FVD. Estas medidas incluyen: el diámetro pupilar (Φ), el número de parpadeos en un tiempo determinado, el porcentaje de completación de cada parpadeo y el índice de respuesta ocular.

En este experimento, la principal variable respuesta será la diferencia en el diámetro pupilar ($\Delta\Phi$), calculada como la resta entre el diámetro pupilar al final del experimento y al inicio del mismo. Esto nos permitirá evaluar de manera objetiva el efecto de los dos factores seleccionados: el brillo de la pantalla y la duración de la exposición. Se asignarán dos niveles a cada uno de los factores del problema, y las mediciones se realizarán con 8 participantes. Cada combinación posible de los factores será evaluada dos veces y asignada de manera aleatoria, siguiendo un esquema de **aleatorización simple**.

Además, se incluirá una segunda variable respuesta: el diámetro de los lentes electrónicos utilizados durante la prueba. Esto permitirá evaluar si existe una relación entre la potencia óptica de los lentes y la fatiga visual digital. Este enfoque asegura un análisis más completo sobre cómo estas variables interrelacionadas contribuyen a la FVD.

Objetivos

El objetivo principal es diseñar y realizar un experimento que permita determinar si existe un cambio significativo en la potencia óptica de lentes electrónicos y en el diámetro pupilar después de una exposición prolongada a una pantalla digital, evaluando la fatiga visual mediante un ANOVA de medidas repetidas con dos factores: **brillo y tiempo de exposición**.

Antecedentes del Problema

El uso prolongado de pantallas digitales ha sido identificado como un factor que contribuye a la fatiga visual digital (FVD). Estudios previos han explorado sistemas de lentes electrónicos controlados por señales biológicas, diseñados para ajustar su curvatura óptica en respuesta a las necesidades del usuario. Este proyecto busca cuantificar si, tras la exposición a pantallas durante periodos prolongados, los lentes electrónicos presentan cambios en su potencia óptica como consecuencia de la FVD. Además, se analizará cómo los factores brillo y tiempo de exposición influyen en esta condición.

Descripción de los Datos y su Origen

Los datos serán recolectados de un experimento diseñado con 8 participantes. Se registrarán las siguientes variables:

- **Potencia Óptica de los Lentes (Izquierdo y Derecho):** Medida en dioptrías antes y después de la exposición para evaluar posibles ajustes relacionados con la fatiga visual.
- **Diámetro de la Pupila:** Diferencia en el diámetro pupilar ($\Delta\Phi$), calculada como el cambio entre el inicio y el final del experimento. Esta variable será medida a través de grabaciones de video durante el experimento.
- **Brillo:** Nivel de luminosidad de la pantalla, con dos niveles predefinidos: alto y bajo.
- **Tiempo de exposición:** Periodo durante el cual cada participante estará expuesto a la pantalla, con dos niveles: 45 minutos y 1 hora.

Variables de Control y de Respuesta

Variables de control:

- **Brillo:** Dos niveles (alto y bajo).
- **Tiempo de exposición:** Dos niveles (45 minutos y 1 hora).

Variables de Respuesta

- **Diámetro de la Pupila:** Se medirá la diferencia en el diámetro pupilar ($\Delta\Phi$), calculada como el tamaño de la pupila al final del experimento menos su tamaño al inicio. Esta medida permitirá evaluar el efecto de los factores experimentales.

Variables Constantes Durante el Experimento

- **Distancia de enfoque:** La distancia entre los ojos del participante y la pantalla digital será fija para todos los participantes.
- **Ángulo de la cabeza:** Se busca que la posición de la cabeza con respecto a la pantalla se mantenga constante durante el experimento.
- **Brillo:** El brillo de la pantalla tendrá dos niveles (alto y bajo), que permanecerán constantes durante toda la prueba de cada participante.
- **Tiempo de exposición:** Los tiempos serán de 45 minutos o 1 hora, según el nivel asignado al participante.
- **Lectura:** Todos los participantes verán el mismo texto, con el mismo tipo y tamaño de letra.

Posibles Factores Perturbadores

- **Día y hora:** Pueden influir en el estado de alerta de los participantes y en las condiciones ambientales (luz, ruido).
- **Cansancio previo:** El nivel de fatiga inicial de los participantes puede afectar las mediciones.
- **Condiciones ambientales:** Factores como temperatura, ruido o comodidad podrían alterar la concentración de los participantes.

Interacciones Posibles entre Variables

- **Brillo y diámetro pupilar:** El brillo alto puede causar una mayor constricción pupilar.
- **Tiempo de exposición y fatiga visual:** Un mayor tiempo de exposición incrementa la fatiga.
- **Brillo y fatiga visual:** Niveles altos o inadecuados de brillo pueden aumentar la fatiga visual digital.

Restricciones del Experimento

- **Duración:** Cada participante estará expuesto durante un máximo de 1 hora.
- **Número de participantes:** El experimento contará con un mínimo de 8 participantes.

Diseño Experimental

El experimento utiliza un diseño factorial completo con dos factores principales:

- **Brillo:** Dos niveles (alto y bajo).
- **Tiempo de exposición:** Dos niveles (45 minutos y 1 hora).

Cada combinación de los factores será evaluada con los 8 participantes, con dos repeticiones para cada combinación. Esto asegura un total de 16 pruebas por participante. La variable principal a medir será la diferencia en el diámetro pupilar ($\Delta\Phi$), calculada como la diferencia entre el diámetro al final y al inicio del experimento.

La aleatorización será utilizada para determinar el orden de las pruebas y minimizar el efecto de posibles sesgos externos, como el cansancio acumulado. Este diseño permite analizar el efecto de los factores y sus interacciones utilizando un análisis ANOVA.

Resultados

Se llevó a cabo un experimento factorial completo con 8 participantes para evaluar el efecto del brillo de la pantalla (**A**) y el tiempo de exposición (**B**) sobre el cambio en el diámetro pupilar ($\Delta\Phi$). Cada factor tuvo dos niveles:

- **Brillo (A):** Alto (1) y Bajo (0).
- **Tiempo de exposición (B):** 1 hora (0) y 45 minutos (1).

La variable respuesta fue la diferencia en el diámetro pupilar al final e inicio del experimento.

Principales hallazgos

- **Efecto del brillo (A):** El brillo tuvo un efecto altamente significativo sobre el cambio pupilar ($p = 8.22 \times 10^{-5}$). Los participantes expuestos a brillo alto mostraron una contracción pupilar más pronunciada en comparación con aquellos expuestos a brillo bajo.
- **Efecto del tiempo (B):** El tiempo de exposición presentó un efecto marginalmente significativo ($p = 0.0556$). Los tiempos más largos tendieron a asociarse con una mayor contracción pupilar.

- **Interacción entre brillo y tiempo (A×B):** No se encontró una interacción significativa ($p = 0.5264$), lo que indica que los efectos del brillo y el tiempo son independientes entre sí.

Los gráficos de interacción y los diagramas de caja apoyan estos resultados, mostrando que el brillo es el factor dominante que afecta el cambio pupilar, mientras que el tiempo tiene un impacto menos pronunciado.

Análisis

Los resultados confirman que el **brillo de la pantalla** es el principal factor que influye en la contracción pupilar. Un brillo alto provoca un mayor esfuerzo ocular, resultando en una contracción más significativa de la pupila. Esto es coherente con la fisiología ocular, donde una mayor intensidad lumínica induce una respuesta pupilar para proteger la retina.

El **tiempo de exposición** también afecta el cambio pupilar, aunque de forma menos contundente. Un tiempo prolongado puede incrementar la fatiga visual, contribuyendo adicionalmente a la contracción pupilar. Sin embargo, dado que no hay interacción significativa entre brillo y tiempo, se deduce que cada factor actúa de manera independiente en su influencia sobre la respuesta pupilar.

Estos hallazgos tienen implicaciones prácticas para reducir la fatiga visual digital:

- **Control del brillo:** Ajustar el brillo de las pantallas a niveles adecuados puede mitigar el impacto negativo en el sistema visual.
- **Gestión del tiempo de exposición:** Limitar el tiempo continuo de exposición a pantallas, o implementar descansos periódicos, puede ayudar a reducir la fatiga ocular.

Ver el **Reporte de análisis y resultados del experimento sobre brillo y tiempo de exposición** adjunto en el anexo, para un análisis detallado y los gráficos que respaldan estos resultados.

Reporte de análisis y resultados del experimento sobre brillo y tiempo de exposición

willandru

Los datos cargados incluyen dos factores principales:

- **A_brillo** (Brillo: 1 = Alto, 0 = Bajo)
- **B_tiempo** (Tiempo: 1 = 45 minutos, 0 = 1 hora) La variable respuesta, **vr_diametro**, representa el cambio en el diámetro pupilar al final del experimento respecto al inicio. Los valores indican cambios negativos (contracción) o positivos (dilatación).

```
# Cargar datos
datos_diametro <- read.csv("datos_diametro.csv")
print(datos_diametro)
```

```
##   A_brillo B_tiempo vr_diametro
## 1         1         1      -0.77
## 2         1         0      -0.74
## 3         0         1       0.19
## 4         0         0      -0.01
## 5         1         1      -0.65
## 6         1         0      -0.88
## 7         0         1       0.11
## 8         0         0      -0.03
```

```
A <- datos_diametro$A_brillo
B <- datos_diametro$B_tiempo
r <- datos_diametro$vr_diametro
```

Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza examina el impacto de los factores A_brillo y B_tiempo, así como su interacción, en la variable respuesta (vr_diametro).

```
av <- aov(r ~ A * B, data = datos_diametro)
summary(av)
```

```
##              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
## A              1  1.3612   1.3612  266.912 8.22e-05 ***
## B              1  0.0364   0.0364    7.147  0.0556 .
## A:B            1  0.0025   0.0025    0.480  0.5264
## Residuals      4  0.0204   0.0051
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Interpretación de Resultados

Efecto Principal de A (Brillo) El brillo (**A_brillo**) muestra un efecto altamente significativo ($p = 8.22 \times 10^{-5}$). Esto indica que los niveles de brillo, ya sea alto o bajo, influyen de manera clara y contundente en el cambio del diámetro pupilar. En términos prácticos, el brillo es un factor determinante en la respuesta pupilar.

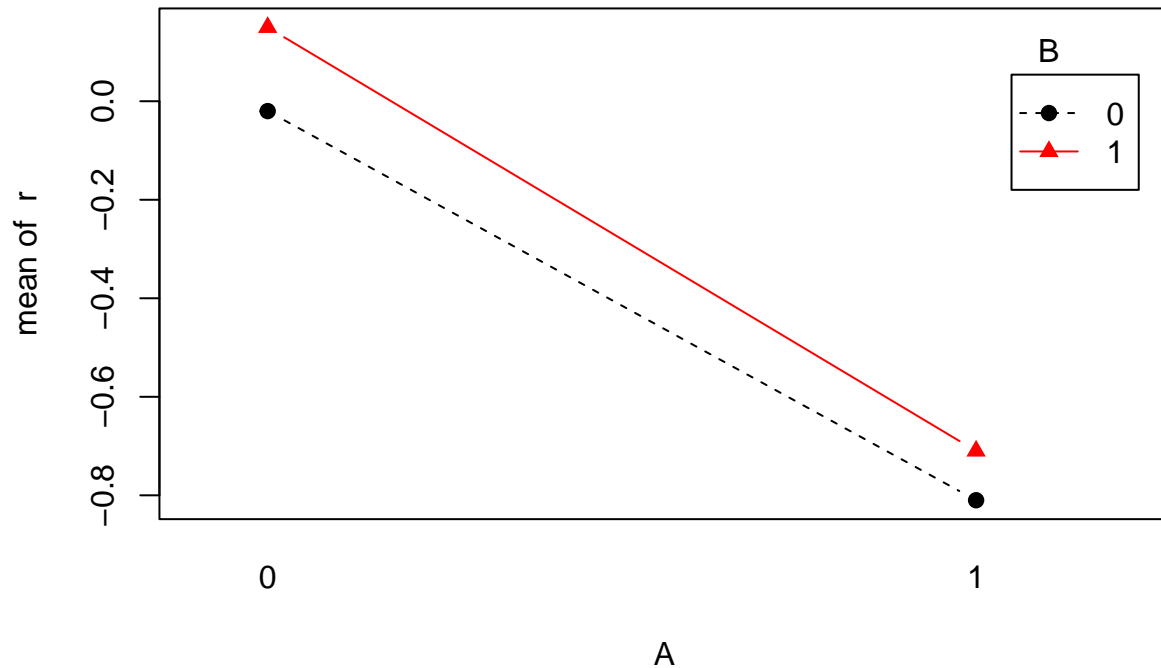
Efecto Principal de B (Tiempo) El tiempo (**B_tiempo**) tiene un efecto marginalmente significativo ($p = 0.0556$), lo que sugiere que la duración de la exposición (45 minutos o 1 hora) también afecta el cambio pupilar. Sin embargo, su influencia no es tan marcada como la del brillo.

Interacción A:B La interacción entre brillo y tiempo ($p = 0.5264$) no resulta significativa. Esto significa que el efecto combinado de estos factores no difiere de lo que se esperaría de la suma de sus efectos individuales. En otras palabras, el impacto del brillo y el tiempo parece ser independiente.

Residuos La variabilidad que no es explicada por los factores ($SumSq = 0.0204$) es bastante baja, lo que sugiere que el modelo ajusta los datos de manera adecuada. La mayor parte de las variaciones observadas en la respuesta pupilar están bien explicadas por los factores incluidos en el análisis.

Gráfico de Interacción: Fijando Niveles de Tiempo (B) y Variando Brillo (A)

```
interaction.plot(x.factor = A,
                 trace.factor = B,
                 response = r,
                 fun = mean,
                 type = "b",
                 col = c("black", "red", "green", "blue"), # Colores
                 pch = c(19, 17, 15, 13),                 # Símbolos
                 fixed = TRUE,                             # Orden de factores
                 leg.bty = "o")
```



El gráfico muestra cómo el cambio pupilar (r) varía con el brillo (A) para cada nivel fijo del tiempo (B):

1. Cuando el tiempo es largo ($B = 0$):

- La línea negra indica que, para tiempo largo, el cambio pupilar es más negativo a medida que el brillo aumenta ($A = 1$).
- Esto refleja que el brillo alto causa una contracción significativa incluso con mayor duración del experimento.

2. Cuando el tiempo es corto ($B = 1$):

- La línea roja muestra que, para tiempo corto, el cambio pupilar es cercano a 0 con brillo bajo ($A = 0$) y se vuelve mucho más negativo con brillo alto ($A = 1$).
- La mayor pendiente sugiere que, en tiempos cortos, el cambio pupilar es más sensible al brillo.

3. Comparación entre niveles de tiempo:

- La pendiente de la línea roja ($B = 1$) es más pronunciada que la de la línea negra ($B = 0$), lo que sugiere que el efecto del brillo es ligeramente más fuerte con tiempos cortos. Sin embargo, en ambos niveles de tiempo, el brillo alto tiene un impacto negativo claro.

4. Interacción entre A y B:

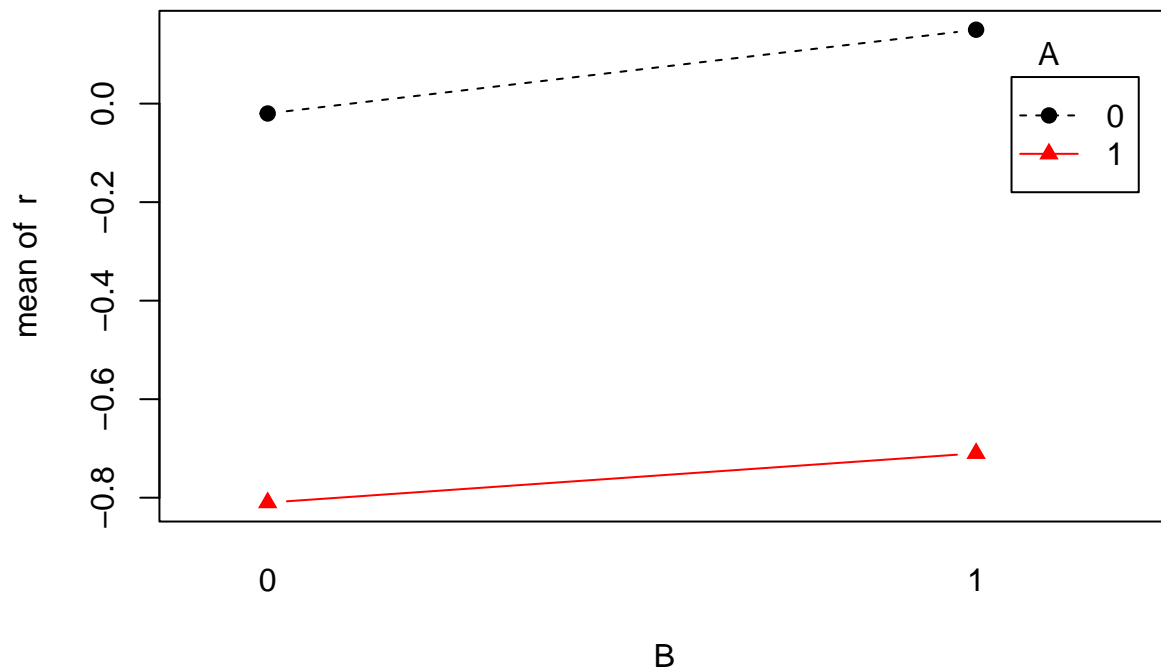
- Las líneas no se cruzan, lo que confirma que no hay una interacción significativa entre el brillo y el tiempo. Esto implica que el efecto del brillo es consistente independientemente del nivel de tiempo.

Conclusión

El brillo alto ($A = 1$) provoca una disminución significativa en el cambio pupilar (r) en ambos niveles de tiempo, lo que indica una contracción pupilar más marcada con mayor intensidad lumínica. Sin embargo, la mayor pendiente en tiempos cortos ($B = 1$) sugiere que la diferencia entre brillo bajo y alto es más notable en exposiciones breves, probablemente porque en tiempos largos el ojo ya está más fatigado y menos sensible a la variación en el brillo.

Gráfico de Interacción: Fijando Niveles de Brillo (A) y Variando Tiempo (B)

```
interaction.plot(x.factor = B,
                 trace.factor = A,
                 response = r,
                 fun = mean,
                 type = "b",
                 col = c("black", "red", "green", "blue"), # Colores
                 pch = c(19, 17, 15, 13),                # Símbolos
                 fixed = TRUE,                             # Orden de factores
                 leg.bty = "o")
```



En este gráfico se observa cómo el cambio pupilar (r) varía con el tiempo (B) para cada nivel fijo del brillo (A):

1. **Cuando el brillo es bajo ($A = 0$):**

- La línea negra muestra que, para brillo bajo, el cambio pupilar tiende a ser cercano a cero ($r \approx 0$) tanto en tiempos cortos ($B = 1$) como largos ($B = 0$).
- Este comportamiento sugiere que, bajo brillo bajo, el tiempo de exposición tiene un impacto limitado sobre el cambio pupilar.

2. **Cuando el brillo es alto ($A = 1$):**

- La línea roja indica que, para brillo alto, el cambio pupilar (r) es siempre negativo, lo que refleja una contracción pupilar.
- Además, la pendiente sugiere que, aunque el cambio pupilar es negativo en ambos casos, es menos pronunciado cuando el tiempo es corto ($B = 1$).

3. **Comparación entre niveles de brillo:**

- Para brillo bajo ($A = 0$), el tiempo tiene poco efecto, ya que el cambio pupilar permanece estable.
- Para brillo alto ($A = 1$), el tiempo tiene un impacto más evidente, con una contracción más marcada en exposiciones largas ($B = 0$).

4. **Interacción entre A y B:**

- Las líneas no son paralelas, lo que indica cierta dependencia entre el brillo y el tiempo. Sin embargo, no hay un cruce significativo, lo que implica que el efecto principal del brillo sigue siendo dominante.

Conclusión El tiempo tiene un impacto más significativo cuando el brillo es alto ($A = 1$), ya que provoca una contracción pupilar mayor en exposiciones largas ($B = 0$). Por otro lado, con brillo bajo ($A = 0$), el cambio pupilar es prácticamente independiente del tiempo de exposición.

```
# Librerías necesarias
library(DoE.base)
```

```
## Loading required package: grid

## Loading required package: conf.design

## Registered S3 method overwritten by 'DoE.base':
##   method      from
##   factorize.factor conf.design

##
## Attaching package: 'DoE.base'

## The following objects are masked from 'package:stats':
##
##   aov, lm

## The following object is masked from 'package:graphics':
##
##   plot.design
```

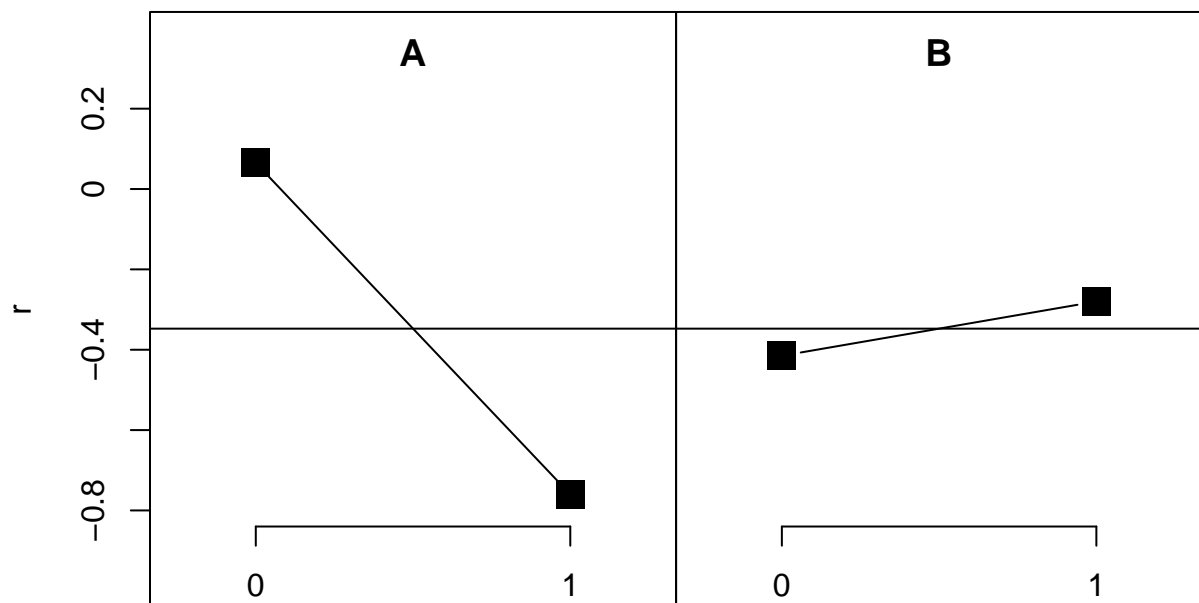
```
## The following object is masked from 'package:base':
##
## lengths
```

```
library(FrF2)
```

Gráfico de Efectos Principales para r

```
MEPlot(av) # Efectos principales de la librería FrF2
```

Main effects plot for r



Este gráfico muestra el efecto principal de los factores **A (Brillo)** y **B (Tiempo)** sobre el cambio pupilar (r):

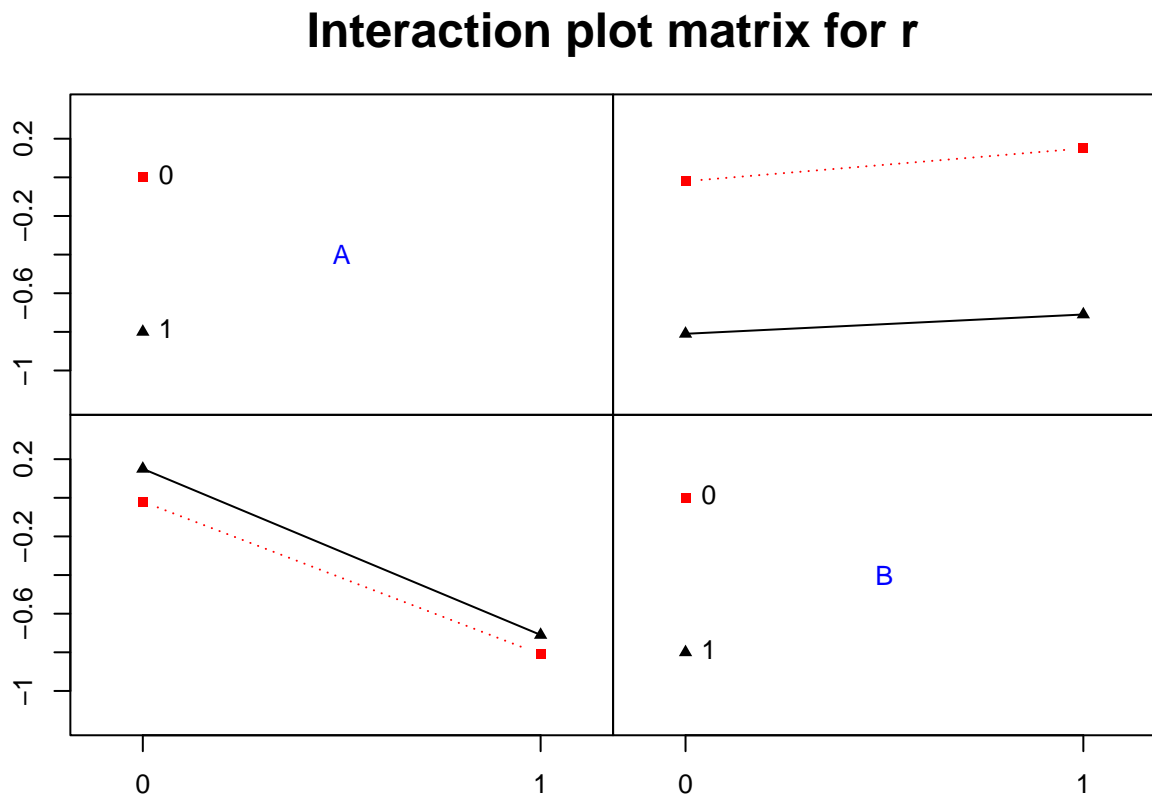
Factor A (Brillo): - Se observa un cambio significativo en r al pasar de brillo bajo ($A = 0$) a brillo alto ($A = 1$). - Con $A = 0$, el valor promedio de r es cercano a 0, indicando un impacto leve en el cambio pupilar. - Con $A = 1$, el valor promedio de r es claramente negativo, reflejando una contracción pupilar marcada debido al brillo alto. - La pendiente pronunciada indica que el brillo tiene un efecto dominante sobre r .

Factor B (Tiempo): - Al pasar de tiempo largo ($B = 0$) a tiempo corto ($B = 1$), se observa un aumento en r . - Para $B = 0$, el cambio pupilar es más negativo, lo que sugiere mayor contracción pupilar en exposiciones largas. - Para $B = 1$, el cambio pupilar es menos negativo, indicando una menor contracción en tiempos cortos. - La pendiente es menos pronunciada, lo que implica que el tiempo tiene un impacto menor en comparación con el brillo.

Conclusión El brillo (A) tiene un efecto más significativo en el cambio pupilar que el tiempo (B). El brillo alto ($A = 1$) provoca una contracción pupilar marcada, mientras que la duración de la exposición (B) modula este efecto de manera más sutil. En general, el modelo confirma que el brillo es el factor principal que influye en la respuesta pupilar.

Matriz de Gráficos de Interacción para r

IAPlot(av)



La matriz de gráficos de interacción muestra cómo los factores **A (Brillo)** y **B (Tiempo)** influyen en el cambio pupilar (r), evaluando sus efectos combinados y principales:

PANEL SUPERIOR IZQUIERDO (EFECTO DE A EN $B = 0$)

- Para tiempos largos ($B = 0$), se observa que el cambio pupilar es significativamente más negativo al aumentar el brillo ($A = 1$). - La línea descendente indica que el brillo tiene un impacto claro en condiciones de tiempo prolongado.

PANEL SUPERIOR DERECHO (EFECTO DE A EN $B = 1$)

- Para tiempos cortos ($B = 1$), el patrón es similar pero con una pendiente más leve. Esto sugiere que el impacto del brillo es menos pronunciado cuando el tiempo es más corto.

PANEL INFERIOR IZQUIERDO (EFECTO DE B EN $A = 0$)

- Para brillo bajo ($A = 0$), el cambio pupilar permanece cercano a 0, independientemente de la duración del tiempo. Esto indica que, en condiciones de baja intensidad lumínica, el tiempo tiene un efecto mínimo sobre r .

PANEL INFERIOR DERECHO (EFECTO DE B EN $A = 1$)

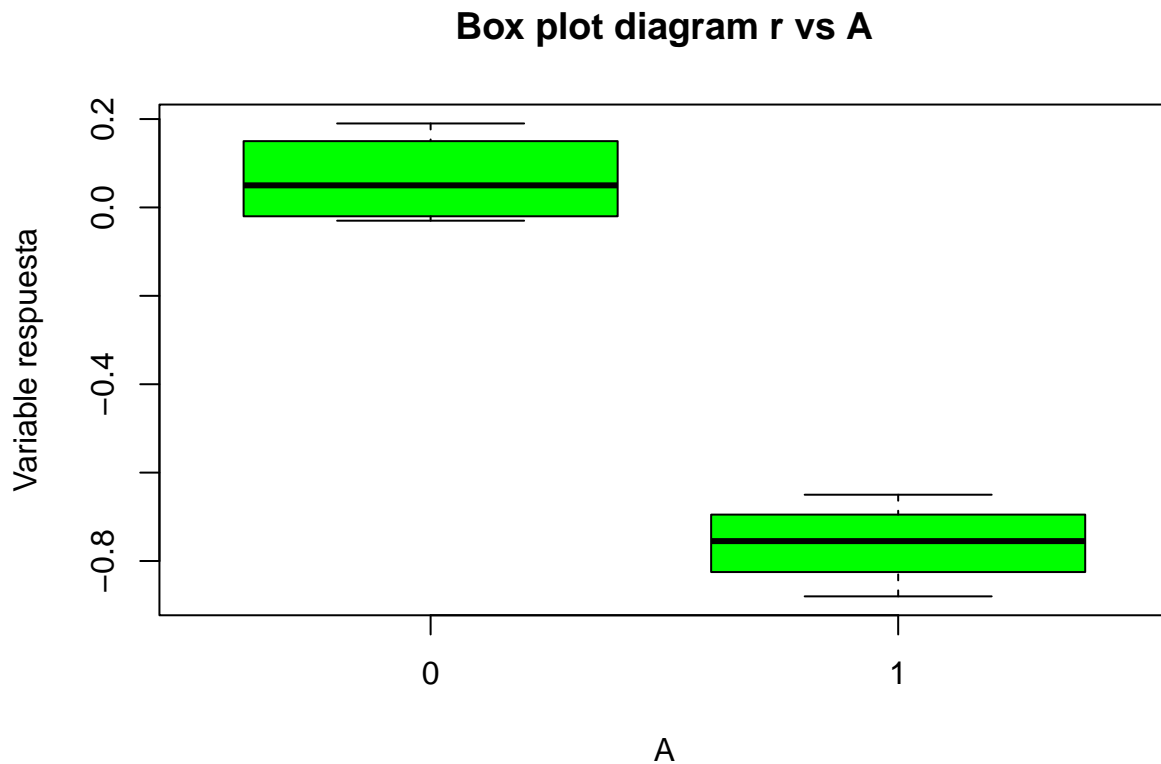
- Para brillo alto ($A = 1$), se observa que el cambio pupilar es más negativo con tiempos largos ($B = 0$) y menos negativo con tiempos cortos ($B = 1$). Esto indica que el tiempo amplifica el impacto del brillo alto.

Conclusión

- **Brillo (A):** Es el factor dominante, causando una contracción pupilar más marcada (r negativo) con brillo alto ($A = 1$) en ambas duraciones de tiempo.
- **Tiempo (B):** Tiene un efecto modulador, siendo más notable cuando el brillo es alto ($A = 1$).
- La interacción entre A y B no es significativa, pero sugiere que el brillo es el principal responsable del cambio pupilar, con el tiempo actuando como un factor secundario.

```
par(mfrow=c(1,1)) # Parámetros gráficos iniciales
```

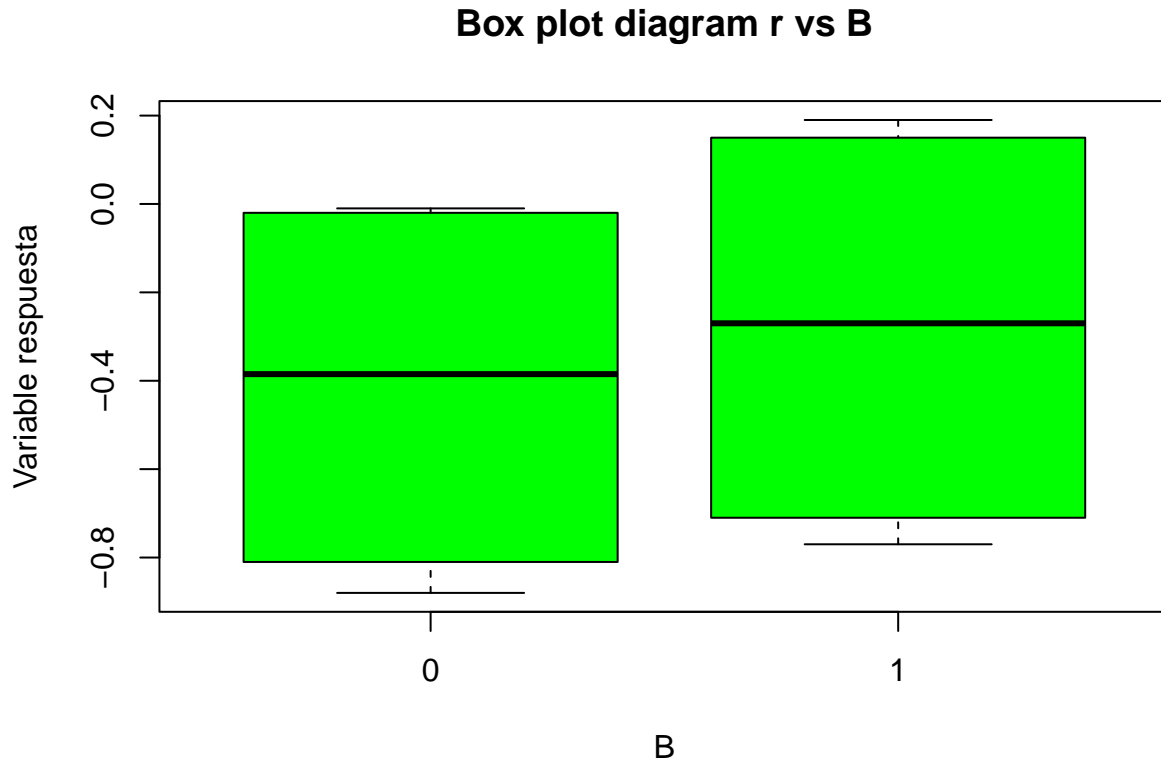
```
boxplot(r ~ A, main = "Box plot diagram r vs A", col = "green", xlab = "A",  
        ylab = "Variable respuesta")
```



Boxplot r vs A (Brillo) - En este gráfico se observa un **cambio notable en r** entre los niveles de brillo:

- $A = 0$ (**Brillo bajo**): Los valores de r están mayormente concentrados alrededor de 0, con una mediana ligeramente positiva, indicando poca contracción pupilar o una dilatación leve. - $A = 1$ (**Brillo alto**): Los valores de r son claramente negativos, con una mediana cercana a -0.8, mostrando una contracción pupilar significativa. - Esto confirma que el brillo es un factor dominante que afecta directamente el cambio pupilar: el brillo alto causa contracción, mientras que el brillo bajo mantiene la pupila más estable.

```
boxplot(r ~ B, main = "Box plot diagram r vs B", col = "green", xlab = "B",
        ylab = "Variable respuesta")
```



Boxplot r vs B (Tiempo) - El gráfico muestra diferencias menos pronunciadas en r entre los niveles de tiempo: - $B = 0$ (**Tiempo largo**): Los valores de r son más negativos, con una mediana alrededor de -0.6, lo que sugiere que tiempos largos inducen una contracción pupilar moderada. - $B = 1$ (**Tiempo corto**): Los valores de r son menos negativos y la mediana está cercana a -0.4, indicando una contracción pupilar menos severa. - El tiempo tiene un efecto más leve en comparación con el brillo, pero aún así influye: tiempos más largos tienden a aumentar la contracción pupilar.

Conclusión Box plot

- **El brillo (A)** tiene un impacto más fuerte que el tiempo (B) sobre el cambio pupilar. El brillo alto provoca contracciones pupilares claras, mientras que el brillo bajo mantiene la pupila estable.
- **El tiempo (B)** modula el cambio pupilar de manera más sutil. Tiempos largos están asociados a una mayor contracción pupilar, pero el efecto es menos pronunciado que el del brillo.