

Posible efecto de interacción entre el paradigma de presentación y el conjunto de estímulos en un teclado virtual controlado a través de una interfaz cerebro-ordenador basada en P300

Fernández-Rodríguez, Álvaro^a; Medina-Juliá, María Teresa^b; Velasco-Álvarez, Francisco^c y Ron-Angevin, Ricardo^d

Departamento de Tecnología electrónica, Universidad de Málaga, España, afernandezrguez@uma.es^a, maytemed@uma.es^b, fvelasco@dte.uma.es^c, rron@uma.es^d

Abstract

Many works in visual P300-based spellers have presented novel stimuli that improve the performance under row-column paradigm (RCP). On the other hand, the rapid serial visual presentation (RSVP) has been presented as an adequate option for patients. Thus, the aim of this work is to assess two set of stimuli under two presentation paradigms: RCP and RSVP. Sixteen participants controlled four conditions: letters in RCP, pictures in RCP, letters in RSVP and pictures in RSVP. The results showed that the improvement effect given by pictures was higher under RCP than under RSVP. Therefore, this work probes that the improvements related to alternative stimuli under RCP may not be directly transferred to the RSVP.

Keywords: *brain-computer interface (BCI), speller, P300, row-column paradigm (RCP), rapid serial visual presentation (RSVP).*

Resumen

Muchos trabajos en spellers basados en señal P300 visual han presentado estímulos novedosos que mejoraron el rendimiento utilizando el paradigma fila-columna (RCP). Sin embargo, la presentación visual serial rápida (RSVP) se ha mostrado como una opción adecuada para pacientes. Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar dos conjuntos de estímulos en dos modos de presentación: RCP y RSVP. Dieciséis participantes controlaron cuatro spellers: letras en RCP, imágenes en RCP, letras en RSVP e imágenes en RSVP. Los resultados mostraron que el efecto de mejora dado por las imágenes fue mayor en RCP que en RSVP. Por lo tanto, este trabajo prueba que las mejoras relacionadas con estímulos alternativos bajo RCP pueden no ser transferidas directamente al RSVP.

Palabras clave: *interfaz cerebro-ordenador, teclado, P300, presentación.*

1. Introducción

El objetivo principal de la tecnología asistencial es mejorar la calidad de vida de sus potenciales usuarios. Estos usuarios son pacientes afectados por determinadas lesiones o enfermedades que causan un deterioro de las capacidades motoras. Un ejemplo de estas enfermedades es la esclerosis de lateral amiotrófica (ELA), causante de un progresivo y severo deterioro de la motricidad (Patterson y Grabois, 1986). En algunos casos, estos pacientes alcanzan el llamado estado de enclaustramiento completo (CLIS, de *complete locked-in state*), en el que incluso la capacidad de controlar la mirada ha sido perdida (Bauer, Gerstenbrand, y Rimpl, 1979; Murguialday et al., 2011). Sin embargo, incluso en estos casos extremos, la capacidad cognitiva de dichos pacientes no tiene por qué estar necesariamente afectada (Fuchino et al., 2008).

Según ha informado (Lemoignan y Ells, 2010), para la mayoría de los pacientes de ELA, la habilidad para comunicarse fue el factor más importante para decidir si deseaban utilizar (o continuar utilizando) la ventilación asistida, por lo que convierte a la comunicación en un factor clave de la calidad de vida de los pacientes. Las interfaces cerebro-ordenador (BCI, de *brain-computer interface*) son un tipo de tecnología que utiliza la actividad cerebral del usuario para establecer un canal de comunicación entre su cerebro y el dispositivo que desea controlar (Birbaumer, 2006; Wolpaw, Birbaumer, McFarland, Pfurtscheller, y Vaughan, 2002). Estos dispositivos pueden ser, por ejemplo, una silla de ruedas, un sistema domótico o un teclado virtual (Corralejo, Hornero, y Álvarez, 2011; Farwell y Donchin, 1988; Zhang et al., 2017). Ya que un sistema BCI no requiere de ningún tipo de motricidad para ser controlado, puede ser una opción adecuada para aquellos pacientes que no puedan realizar ningún movimiento, pero mantengan sus capacidades cognitivas. Debido a su relativamente bajo coste y adecuada resolución temporal, la tecnología más ampliamente utilizada para la grabación de la señal del cerebro es la electroencefalografía (EEG).

Una de las principales aplicaciones desarrolladas con esta tecnología son los teclados virtuales, también conocidos como *spellers*. Estos *spellers* permiten a un usuario seleccionar entre un conjunto de símbolos con fines de comunicación (véase Rezeika et al. (2018) para una revisión extendida sobre *spellers* manejados a través de BCI). La señal del cerebro más utilizada para esta aplicación es el potencial P300. El P300 es una deflexión positiva en el voltaje de la señal EEG alrededor de 300 ms después de la presentación de un estímulo objetivo (Sutton, Braren, Zubin, y John, 1965). Por tanto, el usuario sólo tiene que mantener su atención en el estímulo objetivo, evocando un P300 cada vez que aparezca dicho estímulo. Posteriormente, el sistema reconoce el potencial P300 y selecciona el símbolo que se relaciona con dicho potencial. Por último, el sistema ejecuta el comando asociado a ese estímulo (p. ej., escribir una letra, borrar el último carácter o autocompletar una palabra).

El paradigma de presentación más utilizado por los investigadores ha sido el paradigma de fila-columna (RCP, de *row-column paradigm*), propuesto por Farwell y Donchin (1988). En este paradigma, los estímulos se muestran en una matriz de símbolos, los cuáles son iluminados de forma conjunta por filas y columnas. Sin embargo, debido a la distancia entre los estímulos, el modo de presentación RCP requiere que los usuarios deben tener algún control ocular, ya que el rendimiento se ve severamente afectado en caso contrario (Brunner et al., 2010; Treder y Blankertz, 2010). Además del modo de presentación RCP, hay otras alternativas de presentación de estímulos que no requieren movilidad ocular. El paradigma más utilizado que no requiere movilidad ocular es el de presentación visual rápida (RSVP, de *rapid serial visual presentation*) (Sato y Washizawa, 2016; Treder y Blankertz, 2010).

Debido a la dificultad de control de la mirada en algunos pacientes, el paradigma RSVP podría ser más conveniente que el RCP para dicha población. Sin embargo, la mayoría de investigaciones han quedado centradas en *spellers* dependientes del control ocular (según Rezeika et al. (2018), un 84,4% de teclados virtuales basados en P300 BCI han requerido movilidad ocular). La investigación sobre *spellers* basados en P300 bajo RCP ha sido extensa y productiva; se han realizado diversos estudios sobre el efecto de diferentes estímulos visuales, los tiempos de presentación o pequeñas variaciones en la modalidad de presentación (Li, Liu, Li, y Bai, 2015; Sellers, Krusienski, McFarland, Vaughan, y Wolpaw, 2006; Townsend et al., 2010). Sin embargo, debe ser cuestionado si estos hallazgos realizados en RCP pueden ser transferidos a paradigmas que no requieran control oculomotor, como el RSVP.

Hasta la fecha, se han presentado diversos estímulos que parecen mejorar el rendimiento de forma significativa bajo RCP (Fernández-Rodríguez, Velasco-Álvarez, y Ron-Angevin, 2018; Jones y Sellers, 2019; Kellicut-Jones y Sellers, 2018). Sin embargo, el efecto de mejora producido por estos estímulos bajo RCP no ha sido comparado frente a un posible efecto de mejora en RSVP. Por tanto, el objetivo del presente estudio es poner a prueba dos conjuntos de estímulos (letras e imágenes) bajo dos paradigmas de presentación diferentes (RSVP y RCP) para evaluar las diferencias entre las condiciones.

2. Método

2.1. Participantes

El experimento fue llevado a cabo por 16 participantes (22.33 ± 3.98 años, 5 hombres) quienes declararon tener una visión normal o corregida. Cinco participantes tenían experiencia previa en control de sistemas BCI. El estudio fue aprobado por el Comité Ético de la Universidad de Málaga. Según los informes, ninguno de los participantes declaró antecedentes de enfermedad neurológica o psiquiátrica, o que tomaran algún medicamento regularmente.

2.2. Adquisición de datos y procesamiento de la señal

El EEG fue registrado con una frecuencia de muestreo de 250 Hz usando las posiciones de los electrodos: Fz, Cz, Pz, Oz, P3, P4, PO7 y PO8, según el sistema internacional 10-20. Todos los canales fueron referenciados a TP8, mientras que la tierra fue localizada en AFz. Las señales fueron amplificadas por un amplificador acti-CHamp (Brain Products GmbH, Múnich, Alemania) y un filtrado de paso-banda de 0.1-9 Hz. Todos los aspectos de recopilación de datos EEG y procesamiento fueron controlados por el sistema de BCI2000 (Schalk, McFarland, Hinterberger, Birbaumer, y Wolpaw, 2004). Dicho software empleó el análisis lineal discriminante de pasos hacia delante (SWLDA, de *step-wise lineal discriminant analysis*) de los datos obtenido a través del EEG para crear el clasificador que permitiría realizar la selección de comandos online.

2.3. Condiciones

El *software* utilizado para diseñar la interfaz fue el *UMA-BCI speller*, que sirve como un *front-end* de BCI2000 de fácil manejo (Velasco-Álvarez et al., 2019). El presente trabajo emplea cuatro condiciones, basadas en la combinación de los dos paradigmas (RCP y RSVP) y dos configuraciones de estímulos (letras e imágenes con letras). De manera específica, las cuatro condiciones presentadas fueron: i) letras en RCP (L-RCP, de *letters in row-column paradigm*), ii) imágenes en RCP (P-RCP, de *pictures in row-column paradigm*), iii) letras RSVP (L-RSVP, de *letters in rapid serial visual presentation*), e iv) imágenes en RSVP (P-RSVP, de *pictures in rapid serial visual presentation*) (Figura 1). Las condiciones fueron exhibidas en una pantalla de 15.6 - pulgadas (39,6 cm) a una distancia de 60 cm y a una tasa de refresco de 60 Hz. Para todas las condiciones, cada estímulo fue iluminado durante 192 ms, siendo el tiempo entre iluminación de estímulos de 96 ms; por tanto, el tiempo entre aparición de estímulos fue de 288 ms. Fue establecida una pausa de 3968 ms entre cada selección.

Por un lado, las condiciones bajo RCP – con un tamaño de matriz de 3×3 – se basaron en el paradigma anteriormente mencionado de Farwell y Donchin (1988). Por otra parte, para el RSVP, se presentaron sólo los estímulos intermitentes (es decir, aquellos que se iluminaban durante 96 ms), localizados en el centro de la pantalla. Todos los estímulos (las letras y las imágenes editadas con letras) fueron creadas utilizando el *software* para la edición de imágenes GIMP (www.gimp.org). Para todas las condiciones, la fuente usada para las letras fue Arial (pt 700) en mayúsculas y tenían un tamaño de alrededor de 3 cm x 3.5 cm, dependiendo de la letra. Con respecto a las imágenes, que sólo se utilizan en P-RSVP y P-RCP, su tamaño era igual a 4,7 cm x 3,5 cm (187 px \times 140 px). La distancia entre centros de estímulos adyacentes, fueron 6,7 cm en sentido horizontal y 5,5 cm en sentido vertical. Las

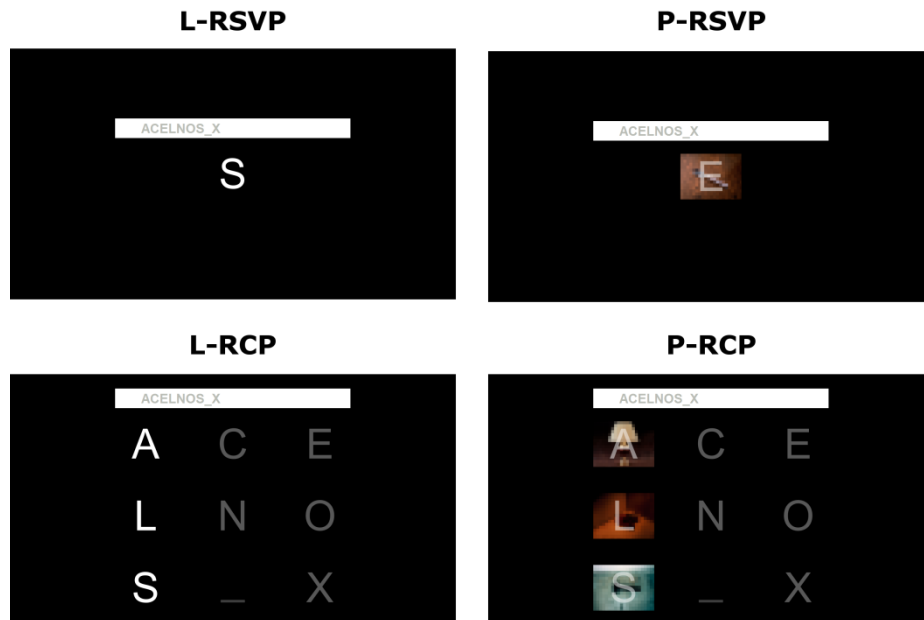


Fig. 1 Condiciones probadas en el estudio: letras en RSVP (L-RSVP), imágenes en RSVP (P-RSVP), letras en RCP (L-RCP) e imágenes en RCP (P-RCP). Debido a los derechos de copyright, las imágenes han sido pixeladas.

letras en las condiciones con imágenes se encontraban en el centro de las imágenes con un nivel de opacidad del 50%. El propósito de agregar la letra a las condiciones con imágenes era la de facilitar con qué letra se encontraba asociada cada imagen, algo especialmente útil para la condición P-RSVP. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el participante tuvo una pausa de 3968 ms en el cual él podría visualizar un documento impreso que se coloca al lado de la pantalla, el cual indicaba a qué imagen corresponde cada letra.

Con respecto a las imágenes, fueron obtenidas del *International Affective Picture System* (IAPS) (Lang, P. J., Bradley, M. M., y Cuthbert, 2008). Fueron escogidas aquellas imágenes con la puntuación más baja en activación y cuyo tamaño fuera similar al anteriormente mencionado (187 px × 140 px). Las imágenes seleccionadas según la codificación del IAPS para la matriz fueron (orden de izquierda-derecha y arriba-abajo): 7175, 7010, 7004, 7031, 7020, 7950, 7110, 7080 y 7006.

2.4. Procedimiento

El experimento se llevó a cabo en una habitación aislada donde sólo el participante estuvo presente en el momento de realizar la prueba. La sesión consistía en dos ejercicios: una tarea de calibración para adaptar el sistema al usuario, y una tarea de escritura – o tarea en línea – en la que el usuario realmente controlaba la interfaz.

Se utilizó un diseño intrasujeto, también llamado de medidas repetidas, por lo que todos los usuarios pasaron a través de todas las condiciones experimentales. Cada condición fue realizada en tres bloques de nueve selecciones para la tarea de calibración, y en un solo bloque de, al menos, 15 selecciones para la tarea de escritura en línea (los usuarios pueden cometer errores y corregirlos, por lo que el número de selecciones podría ser más de 15). El usuario pasaba a la siguiente condición cuando terminaba con los tres bloques de calibración y el bloque de escritura en línea de la condición anterior. El orden de presentación de las condiciones fue elegido a través de un diseño de cuadrado latino para evitar cualquier efecto no deseado, como el aprendizaje o la fatiga.

Para la tarea de calibración, el orden de selección de símbolo fue de izquierda a derecha y de arriba a abajo para cada bloque en la tarea de calibración (es decir, A, C, E, L, N, O, S, _ y X). El número de secuencias por selección fue igual a 5, por lo que cada símbolo fue iluminado 10 veces en RCP (5 de la fila y 5 de la columna) y 5 veces en RSVP. El participante fue instruido para contar mentalmente dichas iluminaciones. El tiempo necesario para completar una secuencia fue de 2784 ms en RSVP y de 1632 ms en RCP. Por otro lado, la frase demandada para la tarea de escritura fue "CENO_EN_LA_CASA". Mientras que para la tarea de calibración el número de secuencias fue el mismo para todos los participantes, el escogido para la tarea de escritura dependió del rendimiento obtenido en dicha calibración. La secuencia elegida para la tarea de escritura en línea fue aquella en la cual el usuario obtuvo su mejor *accuracy* por primera vez en la tarea de calibración.

Después de que el usuario terminara con la tarea de escritura en línea en cada condición, tuvo que responder con puntuaciones de 0 a 10 (de muy bajo a muy alto) a las siguientes preguntas: i) esfuerzo necesario para realizar la tarea correctamente, y ii) nivel de fatiga producido por el control de la interfaz. Asimismo, también debía responder a: i) paradigma de presentación preferido (siendo las opciones RSVP y RCP), ii) estímulos preferidos (siendo las opciones letras e imágenes), y iii) condición favorita (siendo las opciones L-RSVP, P-RSVP, L-RCP y P-RCP).

2.5. Evaluación

Fueron utilizadas dos variables dependientes para evaluar el efecto de los estímulos en cada modo de presentación: i) la *accuracy* del sistema (es decir, el número de selecciones correctas entre el número total de selecciones), y ii) la *tasa de transferencia de información (ITR, de information transfer rate, bits/min)* basada en la fórmula presentada por Wolpaw, Ramoser, McFarland, y Pfurtscheller (1998). Tal y como se ha utilizado en la literatura, el *ITR* no considera el tiempo de pausa entre selecciones. Para analizar los efectos del modo de presentación y del estímulo, se hicieron varios análisis de la varianza (ANOVA) para buscar diferencias significativas. Para las comparaciones múltiples, se aplicó el método de corrección de Bonferroni.

3. Resultados

3.1. Tarea de calibración

Accuracy. Fue realizado un ANOVA ($2 \times 2 \times 5$) de medidas repetidas con los siguientes factores: *presentación* (RSVP y RCP), *estímulo* (letras e imágenes) y *secuencia* (5 secuencias). El análisis mostró un efecto principal de la *presentación* ($F(1, 14) = 36,644, p < 0,001$) y de la *secuencia* ($F(4, 56) = 149,715, p < 0,001$). Por tanto, se podría afirmar que el modo de presentación RCP ($93,98 \pm 10,09\%$) ofreció una mayor *accuracy* que el RSVP ($83,72 \pm 16,79\%$), y que dicha *accuracy* aumentó con el transcurso de las secuencias. Además, los efectos de interacción *presentación* \times *secuencia* ($F(4, 56) = 15,453, p < 0,001$) y *paradigma* \times *estímulo* \times *secuencia* ($F(4, 56) = 10,094, p = 0,001$) resultaron significativos. El efecto de la interacción *paradigma* \times *secuencia* sugiere que las diferencias entre RCP y RSVP se reducen según aumenta el número de secuencias. Por otra parte, el efecto de interacción *paradigma* \times *estímulo* \times *secuencia* sugiere que el efecto de la presentación depende de los estímulos utilizados y el número de secuencias. De manera adicional, se ha realizado un análisis comparando la *accuracy* de las diferentes condiciones individualmente (es decir, L-RSVP, P-RSVP, L-RCP y P-RCP) para cada una de las secuencias. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Accuracy (% , media \pm desviación estándar) media obtenida para cada una de las condiciones y sus respectivas comparaciones múltiples.

Secuencia	Speller			
	(1) L-RSVP	(2) P-RSVP	(3) L-RCP	(4) P-RCP
1	62.72 \pm 12.65 ⁴	62.22 \pm 13 ⁴	73.59 \pm 15.77 ⁴	90.13 \pm 7.36 ^{1,2,3}
2	80.25 \pm 16.12 ⁴	78.95 \pm 12.85 ^{3,4}	89.39 \pm 9.79 ^{2,4}	98.52 \pm 2.34 ^{1,2,3}
3	86.17 \pm 15.87	88.88 \pm 10.07 ⁴	95.56 \pm 5.97	98.77 \pm 2.68 ²
4	91.61 \pm 14.17	94.57 \pm 7.52	95.8 \pm 5.21	99.51 \pm 1.3
5	92.34 \pm 13.96	96.05 \pm 4.94	96.79 \pm 4.17	99.75 \pm 0.96

Nota: letras en RSVP (L-RSVP), imágenes en RSVP (P-RSVP), letras en RCP (L-RCP) e imágenes en RCP (P-RCP). Las diferencias significativas ($p < 0.05$) han sido marcadas con un superíndice para señalar con qué condición ha sido diferente (1 para L-RSVP, 2 para P-RSVP, 3 para L-RCP, y 4 para P-RCP). Ha sido aplicada la corrección de Bonferroni.

ITR. Fue realizado un ANOVA ($2 \times 2 \times 5$) de medidas repetidas con los siguientes factores: *presentación* (RSVP y RCP), *estímulo* (letras e imágenes) y *secuencia* (5 secuencias). El análisis mostró un efecto principal para cada uno de los factores: *presentación* ($F(1, 14) = 579,711, p < 0,001$), *estímulo* ($F(1, 14) = 13,678; p = 0,002$) y *secuencia* ($F(4, 56) = 200,606, p < 0,001$). Por tanto, se podría afirmar que el modo de presentación de RCP ($42,52 \pm 22.85$ bits/min) y las imágenes ($33,07 \pm 24,21$ bits/min) ofrecieron un *ITR* significativamente mayor

que el modo RSVP ($17,94 \pm 7,85$ bits/min) y las letras ($27,39 \pm 16,89$ bits/min), respectivamente. Además, el *ITR* fue menor a medida que aumentaba el número de secuencias. En referencia a los efectos de interacción, todos resultaron significativos: *presentación* \times *estímulo* ($F(1, 14) = 10,003, p = 0,007$), *presentación* \times *secuencia* ($F(4, 56) = 95,208, p < 0,001$), *estímulo* \times *secuencia* ($F(4, 56) = 11,809, p = 0,002$) y *presentación* \times *estímulo* \times *secuencia* ($F(4, 56) = 18,918, p < 0,001$). El efecto de interacción *paradigma* \times *estímulo* \times *secuencia* sugiere que el efecto de la presentación depende de los estímulos utilizados y el número de secuencias. Como en la *accuracy*, se realizó un ANOVA para cada secuencia considerando cada teclado individualmente. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Ratio de transferencia de información (bits/min, media \pm desviación estándar) medio obtenida para cada una de las condiciones y sus respectivas comparaciones múltiples.

Secuencia	Speller			
	(1) L-RSVP	(2) P-RSVP	(3) L-RCP	(4) P-RCP
1	24.68 \pm 10.05 ^{3,4}	24.33 \pm 9.89 ^{3,4}	59.84 \pm 23.15 ^{1,2,4}	89.76 \pm 14.59 ^{1,2,3}
2	21.17 \pm 7.79 ^{3,4}	20.09 \pm 6.73 ^{3,4}	44.67 \pm 10.26 ^{1,2,4}	55.85 \pm 3.69 ^{1,2,3}
3	16.42 \pm 4.89 ^{3,4}	17.3 \pm 4.28 ^{3,4}	34.61 \pm 4.92 ^{1,2}	37.57 \pm 2.7 ^{1,2}
4	14.18 \pm 3.81 ^{3,4}	14.96 \pm 2.73 ^{3,4}	26.14 \pm 3.57 ^{1,2}	28.71 \pm 1.09 ^{1,2}
5	11.54 \pm 2.96 ^{3,4}	12.31 \pm 1.57 ^{3,4}	21.39 \pm 2.37 ^{1,2}	23.13 \pm 0.64 ^{1,2}

Nota: letras en RSVP (L-RSVP), imágenes en RSVP (P-RSVP), letras en RCP (L-RCP) e imágenes en RCP (P-RCP). Las diferencias significativas ($p < 0.05$) han sido marcadas con un superíndice para señalar con qué condición ha sido diferente (1 para L-RSVP, 2 para P-RSVP, 3 para L-RCP, y 4 para P-RCP). Ha sido aplicada la corrección de Bonferroni.

La mejor puntuación en *ITR* del modo RCP frente al RSVP puede ser debido a dos factores: i) la velocidad de la presentación de las secuencias y ii) la mejor *accuracy* proporcionada por las interfaces RCP (como se ha mostrado arriba). A pesar de que el factor estímulo se ha mostrado también como un efecto principal, esto debe ser interpretado con cautela, ya que las diferencias entre las condiciones RSVP han sido inexistentes, mostrándose esta diferencia de forma clara para las condiciones bajo RCP.

3.2. Tarea de escritura en línea

Accuracy. Fue realizado un ANOVA (2×2) de medidas repetidas con los siguientes factores: *presentación* (RSVP y RCP) y *estímulo* (letras e imágenes) (Figura 2). El análisis no mostró ningún efecto principal ni de interacción. Sin embargo, cabe señalar que el efecto de interacción *presentación* \times *estímulo* estuvo cerca de ofrecer un resultado significativo ($F(1, 14) = 4,295; p = 0,057$).

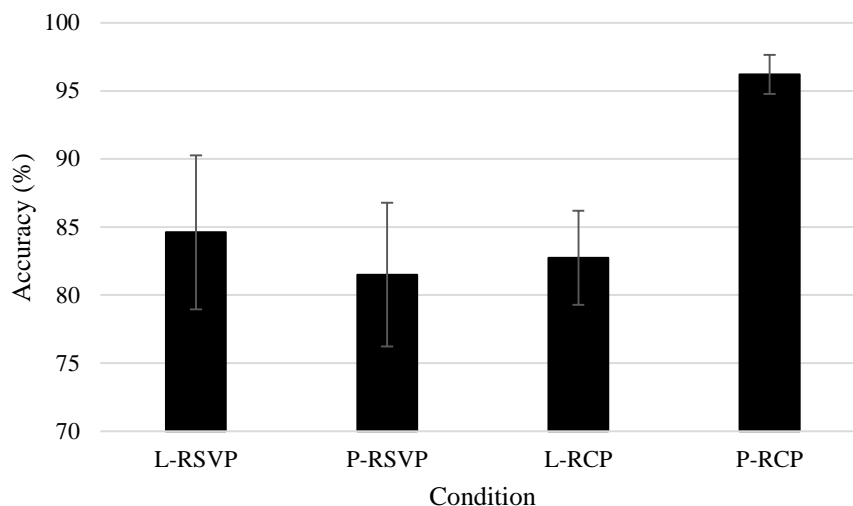


Fig. 2 Accuracy (% , media \pm desviación estándar) en las diferentes condiciones: *letras en RSVP (L-RSVP)*, *imágenes en RSVP (P-RSVP)*, *letras en RCP (L-RCP)* e *imágenes en RCP (P-RCP)*.

A pesar de lo esperado, la *accuracy* en la tarea en línea no ha mostrado ninguna diferencia significativa. Sin embargo, estos resultados pueden explicarse por el criterio seleccionado para elegir el número de secuencias. Este criterio se basó en los resultados de la tarea de calibración, en la que se mostró un efecto techo: la mayoría de los participantes alcanzaban fácilmente el 100% de *accuracy*. Por tanto, el clasificador tuvo que trabajar con una *accuracy* similar entre usuarios para la tarea de escritura (alrededor del 100%), con la diferencia de que unas condiciones tardarían más que otras en hacer cada selección (ya que las condiciones obtuvieron la máxima *accuracy* con un número diferente de secuencias).

Según la revisión sistemática realizada por Rezeika et al. (2018), el presente trabajo ha presentado niveles de *accuracy*, excepto los de la condición P-RCP, que han sido superiores a lo que se ofrece normalmente por otras propuestas. Sin embargo, debido al reducido número de comandos permitidos por nuestra propuesta— que fue seleccionado para establecer una comparación con el mismo número de estímulos en RCP y RSVP sin fatigar al usuario – y los criterios de selección de secuencias para la fase de escritura en línea, una comparación adecuada entre los estudios no es tarea fácil. Como alternativa, a diferencia de la *accuracy*, el *ITR* permite un mejor control de las siguientes variables para ofrecer una comparación más justa entre interfaces: número de elementos disponibles, *accuracy* y velocidad de escritura (ver la fórmula de Wolpaw, Ramoser, McFarland, y Pfurtscheller (1998) para más detalles).

ITR. Fue realizado un ANOVA (2×2) de medidas repetidas con los siguientes factores: *presentación* (RSVP y RCP) y *estímulo* (letras e imágenes). El análisis mostró un efecto principal para los factores *presentación* ($F(1, 14) = 107,809, p < 0,001$) y *estímulo* ($F(1, 14) = 90,215; p < 0,001$). Por tanto, se podría afirmar que el modo de presentación RCP ($35,08 \pm 18,37$ bits/min) y las imágenes fotos ($31,55 \pm 21,27$ bits/min) ofrecieron un *ITR* significativamente mayor que el modo RSVP ($12,58 \pm 5,77$ bits/min) y las letras ($16,83 \pm 8,81$ bits/min), respectivamente. Además, el efecto de interacción *presentación* \times *estímulo* ofreció resultados significativos ($F(1, 14) = 42,468, p < .001$), lo que sugiere que el efecto del estímulo depende de la presentación utilizada. Específicamente, la figura 3 muestra cómo el efecto de imágenes es mayor en RCP que en RSVP. Al igual que ocurrió para el *ITR* de la tarea de calibración, el efecto principal del estímulo debe ser interpretado con cautela, ya que las diferencias entre las condiciones RSVP son mínimas para las letras ($12,27 \pm 5,13$) y para las imágenes ($12,89 \pm 6,52$). Por el contrario, para las condiciones bajo RCP, las diferencias entre las letras y las imágenes fueron notables ($21,11 \pm 9,51$ y $49,05 \pm 13,8$, respectivamente).

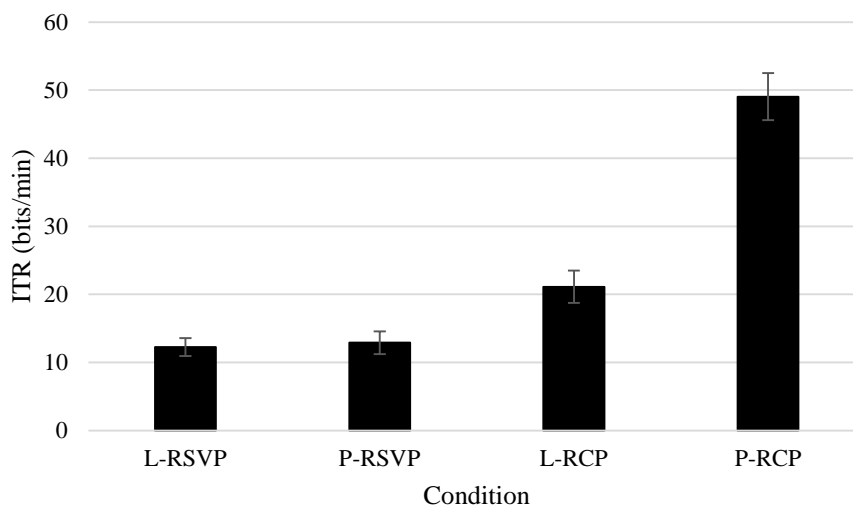


Fig. 3 Ratio de transferencia de información (bits/min, media \pm desviación estándar) en las diferentes condiciones: letras en RSVP (L-RSVP), imágenes en RSVP (P-RSVP), letras en RCP (L-RCP) e imágenes en RCP (P-RCP).

La condición P-RCP ha superado incluso el *ITR* en línea ofrecido por Li et al., (Li et al., 2015) en su propuesta de las caras verdes, que obtuvieron un promedio de 39 ± 5 bits/min. Por lo tanto, se puede afirmar que las imágenes podrían ser estímulos tan buenos como las caras verdes en un *speller* basado en P300. Sin embargo, hay otras propuestas que – mediante el uso de paradigmas más complejos que el modo RCP clásico – han conseguido mostrar mejores resultados en *ITR* (p. ej., Kaufmann y Kübler (2014; Yeom, Fazli, Ller, y Lee

(2014)). Por tanto, podría ser interesante adaptar el uso de estas imágenes a los paradigmas de dicha presentación.

4. Conclusiones

El presente trabajo ha demostrado un fuerte efecto de interacción entre el paradigma de presentación y los estímulos en un *speller* basado en P300 visual. Este hallazgo es especialmente relevante si consideramos que la mayoría de investigaciones se han enfocado en el modo RCP, el cual requiere control ocular, una habilidad que la población objetivo de estos dispositivos puede tener afectada. Por lo tanto, sería conveniente que futuros trabajos pusieran a prueba anteriores propuesta hechas bajo RCP en otros paradigmas más convenientes para los pacientes, como el RSVP.

Asimismo, sería importante llevar a cabo estas propuestas con un mayor número de estímulos, en lugar de sólo nueve. Sin embargo, se destaca la posibilidad de utilizar matrices reducidas (p. ej., Ron-Angevin, Varona-Moya, y Silva-Sauer (2015)), ya que tienden a ofrecer un mejor rendimiento en *accuracy* (Sellers et al., 2006) y podrían ser un objetivo más realista para los futuros pacientes. Se debe recordar que, hasta la fecha, ningún BCI basado en P300 visual ha sido controlada por el paciente en CLIS (Guger et al., 2017). Además, el beneficio de una gran cantidad de elementos disponibles para la obtención de un buen ITR podría no ser suficiente para compensar la pérdida en *accuracy*, como puede verse en la sección de discusión de este artículo cuando se compara con otros trabajos.

En definitiva, además de para validar el uso de imágenes en un *speller* BCI basado en P300 visual, este estudio ha demostrado que no todos los estímulos ofrecen el mismo rendimiento bajo los modos de presentación RCP y RSVP. Por tanto, el presente trabajo muestra la importancia de probar los hallazgos realizados en RCP, relativos a los estímulos, en otros modos de presentación.

Agradecimientos. Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto SICCAU (RTI2018-100912-B-I00, MCIU/AEI/FEDER, UE) y la Universidad de Málaga. Por otra parte, los autores desean dar las gracias a todos los participantes por su colaboración.

5. Referencias

- Bauer, G., Gerstenbrand, F., y Rimpl, E. (1979). Varieties of the locked-in syndrome. *Journal of Neurology*, 221(2), 77–91. <https://doi.org/10.1007/BF00313105>
- Birbaumer, N. (2006). Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control. *Psychophysiology*, 43(6), 517–532. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2006.00456.x>

- Brunner, P., Joshi, S., Briskin, S., Wolpaw, J. R., Bischof, H., y Schalk, G. (2010). Does the “P300” speller depend on eye gaze? *Journal of Neural Engineering*, 7(5), 056013. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/7/5/056013>
- Corralejo, R., Hornero, R., y Álvarez, D. (2011). *A domotic control system using Brain-Computer Interface (BCI). Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 6691 LNCS). https://doi.org/10.1007/978-3-642-21501-8_43
- Farwell, L. A., y Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70(6), 510–523. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(88\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6)
- Fernández-Rodríguez, Á., Velasco-Álvarez, F., y Ron-Angevin, R. (2018). Evaluation of a P300 Brain-Computer Interface Using Different Sets of Flashing Stimuli. In R. Ron-angevin (Ed.), *BRAININFO 2018: The Third International Conference on Neuroscience and Cognitive Brain Information* (pp. 1–4). Venice: IARIA.
- Fuchino, Y., Nagao, M., Katura, T., Bando, M., Naito, M., Maki, A., ... Yoro, T. (2008). High cognitive function of an ALS patient in the totally locked-in state. *Neuroscience Letters*, 435(2), 85–89. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.01.046>
- Guger, C., Spataro, R., Allison, B. Z., Heilinger, A., Ortner, R., Cho, W., y La Bella, V. (2017). Complete locked-in and locked-in patients: Command following assessment and communication with vibro-tactile P300 and motor imagery brain-computer interface tools. *Frontiers in Neuroscience*, 11(MAY), 251. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00251>
- Jones, M. R., y Sellers, E. W. (2019). Faces, locations, and tools: a proposed two-stimulus P300 brain computer interface. *Journal of Neural Engineering*, 1–17. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaff22>
- Kaufmann, T., y Kübler, A. (2014). Beyond maximum speed - A novel two-stimulus paradigm for brain-computer interfaces based on event-related potentials (P300-BCI). *Journal of Neural Engineering*, 11(5). <https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/5/056004>
- Kellicut-Jones, M. R., y Sellers, E. W. (2018). P300 brain-computer interface: comparing faces to size matched non-face stimuli. *Brain-Computer Interfaces*, 5(1), 30–39. <https://doi.org/10.1080/2326263X.2018.1433776>
- Lang, P. J., Bradley, M. M., y Cuthbert, B. N. (2008). *International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual. Technical Report A-8. University of Florida, Gainesville, FL. Technical Report A-8.*
- Lemoignan, J., y Ells, C. (2010). Amyotrophic lateral sclerosis and assisted ventilation: How patients decide. *Palliative and Supportive Care*, 8(2), 207–213. <https://doi.org/10.1017/S1478951510000027>
- Li, Q., Liu, S., Li, J., y Bai, O. (2015). Use of a green familiar faces paradigm improves P300-speller brain-computer interface performance. *PLoS ONE*, 10(6), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130325>

- Murguialday, A. R., Hill, J., Bensch, M., Martens, S., Halder, S., Nijboer, F., ... Gharabaghi, A. (2011). Transition from the locked in to the completely locked-in state: A physiological analysis. *Clinical Neurophysiology*, *122*(5), 925–933. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.08.019>
- Patterson, J. R., y Grabois, M. (1986). Locked-in syndrome: A review of 139 cases. *Stroke*, *17*(4), 758–764. <https://doi.org/10.1161/01.STR.17.4.758>
- Rezeika, A., Benda, M., Stawicki, P., Gembler, F., Saboor, A., y Volosyak, I. (2018). Brain–computer interface spellers: A review. *Brain Sciences*, *8*(4). <https://doi.org/10.3390/brainsci8040057>
- Ron-Angevin, R., Varona-Moya, S., y Silva-Sauer, L. Da. (2015). Initial test of a T9-like P300-based speller by an ALS patient. *Journal of Neural Engineering*, *12*(4), 046023. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/12/4/046023>
- Sato, H., y Washizawa, Y. (2016). An N100-P300 Spelling Brain-Computer Interface with Detection of Intentional Control. *Computers*, *5*(4), 31. <https://doi.org/10.3390/computers5040031>
- Schalk, G., McFarland, D. J., Hinterberger, T., Birbaumer, N., y Wolpaw, J. R. (2004). BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1109/TBME.2004.827072>
- Sellers, E. W., Krusienski, D. J., McFarland, D. J., Vaughan, T. M., y Wolpaw, J. R. (2006). A P300 event-related potential brain-computer interface (BCI): The effects of matrix size and inter stimulus interval on performance. *Biological Psychology*, *73*(3), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2006.04.007>
- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., y John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.150.3700.1187>
- Townsend, G., LaPallo, B. K., Boulay, C. B., Krusienski, D. J., Frye, G. E., Hauser, C. K., ... Sellers, E. W. (2010). A novel P300-based brain-computer interface stimulus presentation paradigm: Moving beyond rows and columns. *Clinical Neurophysiology*, *121*(7), 1109–1120. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.01.030>
- Treder, M. S., y Blankertz, B. (2010). (C)overt attention and visual speller design in an ERP-based brain-computer interface. *Behavioral and Brain Functions*, *6*. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-6-28>
- Velasco-Álvarez, F., Sancha-Ros, S., García-Garaluz, E., Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., y Ron-Angevin, R. (2019). UMA-BCI Speller: an Easily Configurable P300 Speller Tool for End Users. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *172*, 127–138. <https://doi.org/10.1016/J.CMPB.2019.02.015>
- Wolpaw, J. R., Ramoser, H., McFarland, D. J., y Pfurtscheller, G. (1998). EEG-based communication: Improved accuracy by response verification. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, *6*(3), 326–333. <https://doi.org/10.1109/86.712231>
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., y Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, *113*(6), 767–791. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)

- Yeom, S. K., Fazli, S., Ller, K. R. M., y Lee, S. W. (2014). An efficient ERP-based brain-computer interface using random set presentation and face familiarity. *PLoS ONE*, 9(11), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111157>
- Zhang, R., Wang, Q., Li, K., He, S., Qin, S., Feng, Z., ... Li, Y. (2017). A BCI-based environmental control system for patients with severe spinal cord injuries. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2628861>