



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

DEPARTAMENTO DE PSICOLOGÍA DE LA SALUD

Programa de Doctorado en Psicología de la Salud

Análisis de la variabilidad de un patrón motor ante diferentes niveles de constreñimiento

Tesis doctoral

Presentada por
Tomás Urbán Infantes

Elche, 2015



El Dr. D. Juan Carlos Marzo Campos, director del Departamento de Psicología de la Salud de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

AUTORIZA:

Que el trabajo de investigación titulado: “ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE UN PATRÓN MOTOR ANTE DIFERENTES NIVELES DE CONSTREÑIMIENTO” realizado por D. Tomás Urbán Infantes bajo la dirección de Dr. D. Francisco Javier Moreno Hernández sea depositado en el departamento y posteriormente defendido como Tesis Doctoral en esta Universidad ante el tribunal correspondiente.

Lo que firmo para los efectos oportunos en

Elche a 23 de noviembre de 2015

Fdo.: Juan Carlos Marzo Campos

Director del Departamento de Psicología de la Salud

Universidad Miguel Hernández de Elche

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Departamento: Psicología de la Salud

Programa de Doctorado: Psicología de la Salud

Título de la Tesis

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE UN PATRÓN MOTOR ANTE
DIFERENTES NIVELES DE CONSTREÑIMIENTO**

Tesis Doctoral presentada por:

D. Tomás Urbán Infantes

Dirigida por el Dr. D. Francisco Javier Moreno Hernández

El Director

El Doctorando

Elche, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

DEPARTAMENTO DE PSICOLOGÍA DE LA SALUD

Programa de Doctorado en Psicología de la Salud

**Análisis de la variabilidad de
un patrón motor ante
diferentes niveles de
constreñimiento**

Tesis doctoral

Presentada por
Tomás Urbán Infantes

Director:
Dr. D. Francisco Javier Moreno Hernández

Elche, 2015

AGRADECIMIENTOS

Este es el último apartado de esta tesis, el que siempre dejamos para el final, lo que no significa que sea el más sencillo de redactar. Tras varios días posponiendo su escritura, por fin me he sentido con fuerzas para dar por concluido este documento. Por ello, solo me queda agradecer a todas aquellas personas con las que he compartido este largo camino, que una vez visto desde la perspectiva actual han sido muchos años buenos, regulares y no tan buenos...

Aún recuerdo los inicios de nuestra andadura en la universidad, donde todo era nuevo tanto para nosotros como alumnos, como para la totalidad del grupo docente con el que arrancamos nuestros primeros años. Personalmente significó un gran cambio en mi vida, ya que definitivamente había encontrado mi verdadero camino, el cual hacía que el esfuerzo y sacrificio que realizábamos día tras día valiera la pena.

No fue hasta el segundo año en el que tras una serie de circunstancias y casualidades se comenzó a gestar el grupo de amigos con el que realmente disfruté de largos y largos días y, algunas noches, de trabajo inagotable para conseguir nuestro objetivo que para todos era común. De ahí surgen mis compañeros de viaje, amigos con los que sigo compartiendo mis largas horas de trabajo y con los que continúo disfrutando cada día. Siempre hicimos un grupo muy especial, cada uno aportando su granito de arena... Es difícil olvidar aquellas puestas en común.....Héctor, Sarabia, Casto, Alberto y un servidor, nada se nos resistió y, a pesar de los años seguimos estando en el candelero allá donde la vida nos ha ido llevando. Vosotros también formáis parte de esto.

Finalizada nuestra etapa en la licenciatura, nos metimos de lleno en el ámbito de la investigación y, al igual que ocurriera al inicio de nuestro camino, volvíamos a arrancar a la par del CID que se ponía en marcha en aquellos momentos. Aquí es donde he conocido no solo a los brillantes investigadores y docentes que allí ejercen su labor, sino también a las personas que hay detrás de sus currículums, personas maravillosas con las que es un auténtico placer tener el honor de trabajar codo con codo.

Agradecer a todo el personal del centro con el que he compartido muchos momentos y con el que me gustaría seguir compartiendo. Gracias Eduardo por ser un referente y siempre tener una sonrisa para todos. Fran por su constancia y templanza con todo aquello que se propone, siempre haciendo honor a sus raíces. José Luis por hacer las cosas tan fáciles y sentar cátedra en cada una de tus palabras. Gracias Manolo, contigo he compartido mucho en los últimos años y deseo que se mantenga muchos más. Gracias Fito, por todos tus conocimientos y chistes que hacen las delicias de un buen café. Gracias Juan Antonio,

por tener siempre unas palabras de ánimo cuando más se necesitan. Igualmente, gracias a David González, Vicente, Carlos y Diego Pastor, cada uno aporta algo diferente haciendo fácil la convivencia en el centro. Gracias a Raúl López, por aportar las energías revitalizantes y nutricionales para completar esta tesis. Qué habría hecho sin esos suplementos energéticos y nuestras largas horas encima de la bici que espero podamos retomar en breve. Hago lo propio con Jaime y Fran Ayala que aunque han sido los últimos en llegar siempre han estado dispuestos a aportar su granito de arena. No me olvido de Celes y Peláez, que a pesar de todo lo que llevan adelante siempre tiene tiempo para meterse en algún otro berenjenal donde siempre son capaces de implicar al resto. Gracias a Juan Pedro, porque a pesar de vivir bajo el secreto de sumario encuentra el momento para resolver todos los puzles que le planteamos. Todos sois un ejemplo a seguir y una buena imagen en la que podemos fijarnos.

Agradecer de todo corazón a mi director de Tesis por su dedicación en mi formación. Gracias Francis por darme la oportunidad de trabajar a tú lado y de inculcarme la pasión por la variabilidad del movimiento y su complejidad, que han dado como fruto esta tesis doctoral. Siempre he tratado de hacer las cosas lo mejor que he sabido e intentado aprender todo aquello que ha pasado por mis manos. Me hubiera gustado disfrutar más de tus conocimientos, pero comprendo que la gestión que desarrollas actualmente es igual o más importante que el resto. Espero podamos seguir trabajando juntos en el futuro y, con ello, seguir aprendiendo de ese mundo que seguimos explorando. Si en algo no he estado a la altura espero tener la oportunidad de enmendar dicha circunstancia. Gracias de nuevo por tú comprensión, apoyo y consideración. No sé cómo podré compensar toda la dedicación que has tenido conmigo.

Este párrafo está dedicado especialmente al personal del laboratorio de Aprendizaje y Control Motor del cual me siento parte y donde he pasado los últimos cinco años de mi vida. Gracias Raúl, por el tesón que pones en todo lo que haces y que poco a poco está dando sus frutos. Me has dado mucho y espero poder devolverte con creces todo aquello que has hecho por mí. No me olvido del trio extremeño, Rafa, David y Carla que un día aparecieron por aquí y llenaron el CID de proyectos, inquietudes y ganas de trabajar, haciendo de este lugar un poco más divertido. A ver si con el tiempo conseguimos que David explique las cosas con más pausa y adapte su forma de decir las cosas a un ritmo que nos permita entenderlo. Gracias Álvaro por traer sabia nueva al laboratorio y siempre estar dispuesto a ofrecer tú ayuda cuando la necesitamos, espero que pronto podamos escribir esos artículos que tenemos pendientes.

Agradecer a mis compañeros/as Doctorandos Mari Pili, María y Alejandro por tener palabras de ánimo y compartir conmigo sus alegrías y pesares. Solo decirlos que el trabajo finalmente tiene su recompensa. Ánimo a todos. Agradecimientos a todo el personal de los laboratorios Diego López, Marta, Iñaki, Artur, Adrián, Félix y Alicia con los que he pasado tiempo debatiendo sobre tantas cosas. En realidad somos una gran familia que componen todos los miembros del CID y con la que es reconfortante tener la oportunidad de trabajar.

He dejado este último apartado para mi familia porque es gracias a ellos por lo que estoy aquí. Gracias a mis padres y hermanos por estar siempre apoyándome en aquello en que me he embarcado. En especial a mis padres, por hacerme ver que la vida con esfuerzo es más fácil de llevar. Lástima que eso lo aprendiera tarde y espero haber podido enmendarlo a tiempo. Pediros disculpas por no haber sabido escuchar aquello que con tan buena fe me ofrecíais y que no supe entender. Esto también es vuestro.

Para finalizar, a quién más tengo que agradecer por todos estos años compartidos a mi lado es a vosotras, mi pareja, Noelia, la persona con quien comparto mi vida y nuestra hija Marta, por la que luchamos día a día. Gracias por acompañarme en este largo camino lleno de baches y cruces que dificultaban la marcha, pero que nunca han impedido el que las dos estéis a mi lado. Te agradezco tú comprensión porque especialmente has sido tú quien ha sufrido mucho de mi trabajo y a pesar de todo siempre has sabido darme esa visión de optimismo y seguridad para continuar. Solo deseo que sigamos compartiendo nuestras vidas y ambos cumplamos nuestros sueños juntos. Os quiero.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	LA VARIABILIDAD DEL MOVIMIENTO HUMANO.	1
1.2	VARIABILIDAD MOTORA Y COMPORTAMIENTO FUNCIONAL: LA PERSPECTIVA DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS DINÁMICOS.....	7
1.2.1	El ser humano como sistema complejo dinámico y abierto.....	7
1.2.1.1	Auto-organización.	10
1.2.1.2	El concepto de no linealidad.	11
1.2.1.3	Los grados de libertad.....	12
1.2.1.4	Los parámetros de control y de orden.	12
1.2.1.5	La histéresis.....	13
1.2.1.6	Estabilidad y atractores en un sistema dinámico complejo.	13
1.2.2	La variabilidad motora como factor funcional del control y el aprendizaje motor.	14
1.3	EL ANÁLISIS LA VARIABILIDAD MOTORA: HERRAMIENTAS Y APLICACIONES.	18
2	ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	29
2.1	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	29
2.2	OBJETIVOS.	35
2.3	HIPÓTESIS.	36
3	MÉTODO	39
3.1	PARTICIPANTES.	39
3.2	TAREA EXPERIMENTAL.	39
3.3	INSTRUMENTAL.	40
3.4	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN Y DISEÑO.	41
3.4.1	Variable independiente.	41
3.4.1.1	Nivel Bajo: Ejecución de la tarea de punteo sin indicación del punto de impacto (condición Sin Diana).	42
3.4.1.2	Nivel Medio: Ejecución de la tarea ajustada a una diana (situación Con Diana).	42
3.4.1.3	Nivel Alto: Ejecución de la tarea ajustada a una diana con aplicación de recompensa (situación Con Recompensa).	42
3.4.2	Variables dependientes.	45

3.4.2.1	Variables utilizadas para evaluar la magnitud del error.	45
3.4.2.2	Variables utilizadas para evaluar la variabilidad del error.....	46
3.4.2.3	Variables utilizadas para evaluar la estructura de la variabilidad del resultado del movimiento.....	47
3.4.2.3.1	Regularidad de las series temporales de error y el tiempo de movimiento (TM) en cada una de las tareas.	47
3.4.2.3.2	Auto-correlación de las series temporales del error y el tiempo de movimiento en cada una de las tareas.	49
3.4.2.4	Variables utilizadas para analizar la estructura de la variabilidad de la ejecución del movimiento.	50
3.4.2.4.1	Regularidad de la orientación de la mano en el momento del punteo en cada una de las tareas.	50
3.4.2.4.2	Auto-correlación de la orientación de la mano en el momento del punteo en cada uno de los test.	51
3.4.3	Variables contaminantes.....	51
3.4.3.1	Instrumental de registro.	51
3.4.3.2	Posición del participante durante el proceso de toma de datos.....	51
3.4.3.3	Efectos de los campos electromagnéticos.....	52
3.4.3.4	Situación de registro.....	52
3.4.3.5	Condiciones ambientales.....	52
3.4.3.6	Tiempo de movimiento.....	53
3.4.4	Diseño.	53
3.5	PROCEDIMIENTO.....	54
3.5.1	Estudio piloto.....	54
3.5.2	Situación experimental.....	55
3.6	ANÁLISIS DE DATOS.....	58
3.6.1	Preparación de las series temporales de datos.....	58
3.6.2	Cálculo de las variables dependientes de la ejecución y los resultados del movimiento.....	59
3.6.3	Cálculo del rendimiento en las fases inicial, intermedia y final de las series temporales de error.	59
3.6.4	Análisis de la auto-correlación de las series temporales de error y tiempo de movimiento.....	60
3.6.5	Análisis de la regularidad de las series temporales de error y tiempo de movimiento.....	61
3.6.6	Análisis estadístico.	62
4	RESULTADOS.	65
4.1	ESTUDIO PILOTO.	65

4.1.1	Comparación de la regularidad obtenida por los participantes en el estudio piloto en la tarea sin diana, en los ejes ML y AP en función del tamaño de las series temporales de datos.....	65
4.1.2	Comparación de la regularidad obtenida por los participantes en el estudio piloto en la tarea con diana, en los ejes ML y AP en función del tamaño de las series temporales de datos.....	66
4.1.3	Comparación de la autocorrelación obtenida por los participantes en el estudio piloto en la tarea sin diana, en los ejes ML y AP en función del tamaño de las series temporales de datos.....	68
4.2	ESTUDIO PRINCIPAL.....	70
4.2.1	Resultados descriptivos de las variables de error, autocorrelación y regularidad de todos los participantes en las tareas Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.	71
4.2.2	Resultados del análisis inferencial de los valores de las variables de magnitud del error obtenidos en las situaciones Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.	71
4.2.2.1	Análisis del efecto de las condiciones de ejecución de la tarea sobre las variables de error analizadas.	71
4.2.2.2	Análisis del efecto de las condiciones de ejecución de la tarea sobre la variabilidad del error.	72
4.2.2.3	Análisis de las variables de error y tiempo de movimiento en función de la fase inicial, intermedia y final de los ensayos.	74
4.2.2.4	Valores de correlación en las variables de error en los test Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.....	75
4.2.3	Análisis del efecto de las condiciones experimentales sobre las dinámicas de la estructura de la variabilidad.	76
4.2.3.1	Análisis del efecto de las tres condiciones experimentales en los valores de regularidad de las series temporales de error y tiempo de movimiento.....	76
4.2.3.2	Análisis del efecto de las tres condiciones experimentales en los valores de autocorrelación de las series temporales de error y tiempo de movimiento.....	78
4.2.3.3	Análisis de los valores de autocorrelación de las series temporales de error y tiempo de movimiento segmentado en fases inicial, intermedia y final.	79
4.2.4	Análisis del efecto de las condiciones experimentales sobre las dinámicas de la estructura de la variabilidad en las variables de ejecución del movimiento.	81
4.2.4.1	Valores de regularidad de las series temporales en las variables de ejecución del movimiento. Análisis de la posición de la mano en función de las tres condiciones experimentales.....	81
4.2.4.2	Valores de autocorrelación de las series temporales en las variables de ejecución del movimiento. Análisis de la posición de la mano en función de las tres condiciones experimentales.....	83

4.2.5	Efectos de la manipulación de la evolución de la recompensa en el tiempo sobre el rendimiento, la regularidad y la autocorrelación en la tarea con recompensa.	85
4.2.5.1	Análisis del efecto de la manipulación de la evolución de la recompensa sobre el rendimiento en la tarea.	85
4.2.5.2	Análisis del efecto de la manipulación de la evolución de la recompensa en el tiempo sobre la regularidad de la estructura de la variabilidad.	87
4.2.5.3	Análisis del efecto de la evolución de la recompensa en el tiempo sobre la autocorrelación de la estructura de la variabilidad.....	88
4.2.6	Relación entre complejidad y rendimiento obtenido en las situaciones Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.	90
4.2.6.1	Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento obtenidos en la situación Sin Diana.	90
4.2.6.2	Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento obtenidos en la situación Con Diana.	91
4.2.6.3	Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento obtenidos en la situación Con Recompensa.....	92
4.2.6.4	Correlación entre los valores de regularidad y autocorrelación en la situación Sin Diana y el rendimiento obtenido en las situaciones Con Diana y Con Recompensa.....	93
4.2.6.5	Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento en la situación Con Diana y la regularidad y rendimiento obtenido en la situación Con Diana y Con Recompensa.....	94
4.2.6.6	Correlación entre los valores de regularidad y rendimiento en la situación Con Diana y la diferencia en el rendimiento entre las situaciones Con Diana y Con Recompensa.....	96
5	DISCUSIÓN	99
5.1	RENDIMIENTO OBTENIDO EN LAS VARIABLES DE ERROR EN LAS TAREAS DE PUNTEO.	101
5.2	REGULARIDAD DE LAS VARIABLES DE ERROR Y TIEMPO DE MOVIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA TAREA.....	105
5.3	AUTOCORRELACIÓN DE LAS VARIABLES DE ERROR Y TIEMPO DE MOVIMIENTO EN LAS TAREAS DE PUNTEO.....	108
5.4	RELACIÓN ENTRE COMPLEJIDAD Y RENDIMIENTO.....	114
6	CONCLUSIONES	119
7	LIMITACIONES Y PROSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN	125

8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
9	ANEXOS.....	141



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. FÓRMULAS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE LOS DATOS.	5
FIGURA 2. SITUACIÓN EXPERIMENTAL.....	40
FIGURA 3. SOFTWARE EN ENTORNO LABVIEW CREADO PARA CONTROLAR LA FRECUENCIA DE EJECUCIÓN MEDIANTE LA FUNCIÓN DE METRÓNOMO, ASÍ COMO PARA CALCULAR EL TIEMPO DE EJECUCIÓN Y LA REDUCCIÓN DE LA RECOMPENSA EN FUNCIÓN DEL AJUSTE DE PRECISIÓN.	41
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA EVOLUCIÓN POR MINUTO DE LA RECOMPENSA DE CADA GRUPO EXPERIMENTAL.	44
FIGURA 5. PARTICIPANTE REALIZANDO LA TAREA DE PUNTEO CON DIANA DURANTE UNA SITUACIÓN EXPERIMENTA... ..	55
FIGURA 6. PARTICIPANTE REALIZANDO LA TAREA DE PUNTEO SIN DIANA DURANTE UNA SITUACIÓN EXPERIMENTAL.... ..	56
FIGURA 7. SOFTWARE EN ENTORNO LABVIEW CREADO PARA CALCULAR LAS SERIES TEMPORALES EN BASE A LA POSICIÓN DE LA PUNTA DEL ESTILETE EN CADA UNA DE LAS REPETICIONES EN EL MOMENTO DEL IMPACTO DE LA PUNTA SOBRE LA SUPERFICIE HORIZONTAL CALCULADAS EN BASE AL PICO MÁXIMO.	58
FIGURA 8. SOFTWARE EN ENTORNO LABVIEW CREADO PARA CALCULAR LOS PROMEDIOS DE LAS VARIABLES DE ERROR POR VENTANAS INICIAL, INTERMEDIA Y FINAL.	60
FIGURA 9. SOFTWARE EN BASE LABVIEW PARA EL CÁLCULO DE LA AUTO-CORRELACIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES.	61
FIGURA 10. RESULTADOS DE LA REGULARIDAD DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE ML EN LA TAREA SIN DIANA.	65
FIGURA 11. RESULTADOS DE LA REGULARIDAD DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE AP EN LA TAREA SIN DIANA.....	66
FIGURA 12. RESULTADOS DE LA REGULARIDAD DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE ML EN LA TAREA CON DIANA.	67
FIGURA 13. RESULTADOS DE LA REGULARIDAD DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE AP EN LA TAREA CON DIANA.	67
FIGURA 14. RESULTADOS DE AUTOCORRELACIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE ML EN LA TAREA SIN DIANA.....	68
FIGURA 15. RESULTADOS DE AUTOCORRELACIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE AP EN LA TAREA SIN DIANA.....	69
FIGURA 16. RESULTADOS DE AUTOCORRELACIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE ML EN LA TAREA CON DIANA.	69

FIGURA 17. RESULTADOS DE AUTOCORRELACIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS EN EL EJE AP EN LA TAREA CON DIANA.	70
FIGURA 18. MAGNITUD DEL ERROR EN FUNCIÓN DE LOS CONSTREÑIMIENTOS DE EJECUCIÓN DE LA TAREA.....	72
FIGURA 19. VARIABILIDAD DEL ERROR EN FUNCIÓN DE LOS CONSTREÑIMIENTOS DE EJECUCIÓN DE LA TAREA.	73
FIGURA 20. REGULARIDAD DE LAS SERIES TEMPORALES DE ERROR Y EL TIEMPO DE MOVIMIENTO EN FUNCIÓN DE LOS CONSTREÑIMIENTOS DE EJECUCIÓN DE LAS TAREAS.	77
FIGURA 21. AUTOCORRELACIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES DE ERROR Y EL TIEMPO DE MOVIMIENTO EN FUNCIÓN DE LOS CONSTREÑIMIENTOS DE EJECUCIÓN DE LAS TAREAS.....	79
FIGURA 22. REGULARIDAD DE LA ORIENTACIÓN DE LA MANO EN EL MOMENTO DEL PUNTEO EN FUNCIÓN DE LOS CONSTREÑIMIENTOS DE EJECUCIÓN DE LAS TAREAS.	82
FIGURA 23. REGULARIDAD DE LA ORIENTACIÓN DE LA MANO EN EL MOMENTO DEL PUNTEO EN FUNCIÓN DE LOS CONSTREÑIMIENTOS DE EJECUCIÓN DE LAS TAREAS.	84



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA COMPLEJO (MORENO Y ORDOÑO, 2009).....	10
TABLA 2. INFORMACIÓN OFRECIDA A LOS PARTICIPANTES CADA MINUTO EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA.	44
TABLA 3. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LAS VARIABLES DE ERROR EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.	72
TABLA 4. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LA VARIABILIDAD DEL ERROR EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.	73
TABLA 5. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE ERROR POR FASES DE LAS VARIABLES DE POSICIÓN EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.	75
TABLA 6. CORRELACIONES ENTRE LAS VARIABLES DE ERROR EN LAS TRES TAREAS REALIZADAS	76
TABLA 7. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE REGULARIDAD OBTENIDOS EN LOS TEST EN LAS VARIABLES DE ERROR Y TIEMPO DE MOVIMIENTO EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.	78
TABLA 8. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE AUTOCORRELACIÓN DE LAS VARIABLES DE POSICIÓN Y TIEMPO DE MOVIMIENTO OBTENIDOS EN CADA UNA DE LAS TAREAS.	79
TABLA 9. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE AUTOCORRELACIÓN DE LAS VARIABLES DE POSICIÓN Y TIEMPO DE MOVIMIENTO POR VENTANAS EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.	80
TABLA 10. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE REGULARIDAD OBTENIDOS EN LOS TEST EN LAS VARIABLES DE AZIMUT, ELEVACIÓN Y ROTACIÓN EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	83
TABLA 11. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE AUTOCORRELACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LA MANO EN LAS TRES TAREAS REALIZADAS.	84
TABLA 12. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DEL ERROR RADIAL POR MINUTO MOSTRADO POR LOS PARTICIPANTES EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL.	86
TABLA 13. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS VALORES DE ERROR OBTENIDOS EN CADA UNA DE LAS FASES EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA.	87
TABLA 14. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS RESULTADOS DE REGULARIDAD MOSTRADOS POR LOS PARTICIPANTES EN LAS VARIABLES ANALIZADAS EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA.....	88
TABLA 15. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE AUTOCORRELACIÓN DE LAS VARIABLES ANALIZADAS EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA.	89
TABLA 16. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS VALORES DE AUTOCORRELACIÓN OBTENIDOS EN CADA UNA DE LAS FASES EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA.	89

TABLA 17. CORRELACIONES ENTRE LAS VARIABLES DE AUTOCORRELACIÓN, REGULARIDAD Y RENDIMIENTO EN LA SITUACIÓN SIN DIANA	91
TABLA 18. CORRELACIONES ENTRE LAS VARIABLES DE AUTOCORRELACIÓN, REGULARIDAD Y RENDIMIENTO EN LA SITUACIÓN CON DIANA.....	92
TABLA 19. CORRELACIONES ENTRE LAS VARIABLES DE AUTOCORRELACIÓN, REGULARIDAD Y RENDIMIENTO EN LA SITUACIÓN CON DIANA Y CON RECOMPENSA.	93
TABLA 20. CORRELACIONES ENTRE LA REGULARIDAD Y LA AUTOCORRELACIÓN OBTENIDAS EN LAS SERIES TEMPORALES DE ERROR EN LA TAREA SIN DIANA Y EL RENDIMIENTO OBTENIDO EN LA TAREA CON DIANA Y CON RECOMPENSA.	94
TABLA 21. CORRELACIONES ENTRE LA AUTOCORRELACIÓN, REGULARIDAD Y RENDIMIENTO EN LA TAREA CON DIANA Y LA AUTOCORRELACIÓN, REGULARIDAD Y RENDIMIENTO OBTENIDO EN LA TAREA CON RECOMPENSA.....	96
TABLA 22. CORRELACIONES ENTRE REGULARIDAD Y RENDIMIENTO CON DIANA Y LAS DIFERENCIAS RENDIMIENTO ENTRE LAS SITUACIONES CON DIANA Y CON RECOMPENSA.	97



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADOS DE LOS PARTICIPANTES EN LAS VARIABLES DE ERROR, AUTOCORRELACIÓN Y REGULARIDAD EN LA TAREA SIN DIANA.	141
ANEXO 2. RESULTADOS DE LOS PARTICIPANTES EN LAS VARIABLES DE ERROR, AUTOCORRELACIÓN Y REGULARIDAD EN LA TAREA CON DIANA.....	142
ANEXO 3. RESULTADOS DE LOS PARTICIPANTES EN LAS VARIABLES DE ERROR, AUTOCORRELACIÓN Y REGULARIDAD EN LA TAREA CON RECOMPENSA.....	143
ANEXO 4. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE REGULARIDAD OBTENIDOS EN LOS TEST EN LAS VARIABLES DE ERROR Y TIEMPO DE MOVIMIENTO EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.	144
ANEXO 5. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE REGULARIDAD OBTENIDOS EN LOS TEST EN LAS VARIABLES DE ERROR Y TIEMPO DE MOVIMIENTO EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.	144
ANEXO 6. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE REGULARIDAD OBTENIDOS EN LOS TEST EN LAS VARIABLES DE AZIMUT, ELEVACIÓN Y ROTACIÓN EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	145
ANEXO 7. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS VALORES DE REGULARIDAD OBTENIDOS EN LOS TEST EN LAS VARIABLES DE AZIMUT, ELEVACIÓN Y ROTACIÓN EN LAS TRES CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	145
ANEXO 8. EVOLUCIÓN DEL ERROR RADIAL POR MINUTO EN LA TAREA CON RECOMPENSA DE LOS PARTICIPANTES EN EL ESTUDIO.	146
ANEXO 9. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS RESULTADOS DE REGULARIDAD MOSTRADOS POR LOS PARTICIPANTES EN LAS VARIABLES ANALIZADAS EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA....	147
ANEXO 10. ESTADÍSTICOS INFERENCIALES DE LOS RESULTADOS DE REGULARIDAD MOSTRADOS POR LOS PARTICIPANTES EN LAS VARIABLES ANALIZADAS EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA....	147

GUÍA DE ABREVIATURAS

TSD: Teoría de los sistemas dinámicos

DOF: Grados de libertad

RQA: Análisis de recurrencia

LyE: Exponente de Lyapunov

ApEn: Entropía aproximada

CoP: Centro de presiones

SampEn: Entropía muestral

FuzzyEn Entropía borrosa

MSE: Entropía multiescala

PE: Entropía de Permutación

EEG: Electroencefalograma

DFA: Análisis de Fluctuaciones sin Tendencias

SD: Desviación Típica

EA: Error Absoluto

AP: Eje anteroposterior

ML: Eje mediolateral

ER: Error Radial

ERM: Error Radial Medio

TM: Tiempo de Movimiento



1 INTRODUCCIÓN

1.1 LA VARIABILIDAD DEL MOVIMIENTO HUMANO.

La variabilidad es una característica inherente de la naturaleza que se observa de manera prominente en los sistemas biológicos (Newell y Corcos, 1993) y por tanto en el ser humano, siendo ésta una característica diferenciadora de cada individuo que lo hace único. Es sencillo comprobar lo diferentes que somos con simplemente observar nuestro comportamiento, nuestro aspecto o nuestros gustos. Algunos visten con colores claros, otros con oscuros; a unos les gusta llevar zapatos, a otros deportivas. Los hay morenos, rubios, castaños, con ojos verdes, azules o marrones. Unos prefieren la playa, otros la montaña, los viajes o quedarse en casa. Son innumerables los aspectos que nos hacen únicos y no debería sorprender que esas diferencias también se observen en nuestro movimiento.

Desde el punto de vista del movimiento humano, esta variabilidad es descrita como variaciones habituales que se producen durante la ejecución de múltiples repeticiones de una misma tarea (Glass y Mackey, 1988; Newell y Slifkin, 1998; Stergiou, Harbourne y Cavanaugh, 2006). La variabilidad del movimiento ha sido analizada durante la ejecución de diferentes acciones motrices tales como el lanzamiento del tiro libre en baloncesto (Button, MacLeod, Sanders y Coleman, 2003; Hamilton y Reinschmidt, 1997; Liu y Burton, 1999; Stuart Miller, 2002; Robins, Wheat, Irwin y Bartlett, 2006), saque en tenis (Chow y col., 2003; Menayo, Fuentes, Moreno, Reina y García, 2010; Menayo, Moreno, Fuentes, Reina y Damas, 2012; Urbán, Moreno y Hernández-Davó, 2012), lanzamiento de jabalina (Best, Bartlett y Sawyer, 2010; Morris, Bartlett y Fowler, 1997), así como en acciones cotidianas de la vida diaria que implican movimientos de alcance de objetivos y agarre (Darling, Cole y Abbs, 1988; Jaric, Ferreira, Tortoza, Marconi y Almeida, 1999; Pérez y Nussbaum, 2006; Worringham, 1991).

A lo largo de la historia, numerosos investigadores se han preguntado sobre las razones por las que el ser humano tiene un comportamiento motor variable, y cuál es la explicación de que este fenómeno se produzca. El primer estudio relacionado con la variabilidad del movimiento fue realizado por Woodworth en 1899, quien describió este fenómeno con un experimento llevado a cabo mediante la realización de una tarea que consistía en marcar líneas durante el desplazamiento de un punto a otro, ajustándose a una secuencia temporal emitida por un metrónomo (ver Vaillancourt y Newell, 2002 para una revisión). Nikolai Bernstein trató de aproximarse a la variabilidad motora como una forma de abordar el estudio del Control Motor. Bernstein (1967) argumentaba que la inexistencia de repeticiones exactas de un mismo gesto indicaba que cada ejecución formaba parte de una única repetición, como un acto único en el que se implicaban patrones neurales y motores diferentes. En la actualidad, la variabilidad del movimiento humano ha sido abordada por numerosos estudios y bajo diferentes perspectivas.

Partiendo de preceptos cognitivos, y a partir de la teoría del esquema motor (Schmidt, 1975), Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank y Quinn (1979) trataron de explicar este fenómeno a través de lo que denominaron la Teoría de la Variabilidad del Impulso. Bajo esta perspectiva, interpretaban la variabilidad del movimiento como ruido o fluctuaciones aleatorias de los mecanismos neuromusculares durante la ejecución de un programa motor, que se reflejaba en una traducción inexacta a la actividad neuromuscular que limita el control del sistema, desembocando en errores en el proceso de transmisión de los programas motores a la actividad neuromuscular, que deberían ser eliminados o minimizados (Newell y Slifkin, 1998; Williams, Davids y Williams, 1999) con el fin de optimizar y mejorar el control del movimiento. Con la práctica, la variabilidad mostrada en el movimiento se reduce a medida que incrementa el nivel de habilidad. No obstante, ese ruido no es eliminado completamente, observándose como fluctuaciones aleatorias del movimiento. Desde esta perspectiva, la variabilidad ha sido interpretada como medida de

rendimiento y, por tanto, como un medio para valorar la eficacia del sistema sensoriomotor (Sherwood, Schmidt y Walter, 1988).

La variabilidad como medida de rendimiento ha sido abordada tradicionalmente mediante procedimientos que evaluaban la variabilidad de la fuerza (o de la ejecución) y la variabilidad del resultado. La variabilidad de la fuerza hace referencia a las fluctuaciones producidas a nivel neuromuscular durante contracciones musculares sucesivas como resultado de la transmisión del impulso, lo que provoca modificaciones en la aceleración de los segmentos corporales, que a su vez desemboca en un incremento o disminución de la velocidad, al igual que en contracciones isométricas provoca variaciones durante la aplicación de una fuerza (Cattell y Fullerton, 1892; Newell y Carlton, 1985, 1988; Schmidt y col., 1979; Sherwood y Schmidt, 1980; Sherwood y col., 1988; Slifkin y Newell, 1999). La variabilidad de la fuerza también se puede denominar variabilidad en la ejecución, entendiendo ésta como la desviación de una secuencia de movimientos o posiciones articulares durante la ejecución repetida de una misma tarea respecto a un criterio establecido previamente y que es estudiada mediante variables cinéticas o cinemáticas (Menayo y col., 2010; Miller, 2002; Sabido, Caballero y Moreno, 2009; Scholz, Schöner y Latash, 2000; Urbán, Gutiérrez y Moreno, 2015; Urbán y col., 2012).

Por otro lado, las variaciones en las consecuencias externas de una acción se han definido como variabilidad del resultado, y se han cuantificado tradicionalmente por medio de la dispersión de los valores de los resultados obtenidos durante la realización de la tarea (Barlett, Wheat y Robins, 2007; Hernández-Davó, Urbán, Sarabia, Juan-Recio y Moreno, 2014; Schmidt y col., 1979; Urbán y col., 2015). Por ejemplo, durante una tarea de lanzamiento de dardos, la puntuación o resultado es la suma de los puntos obtenidos en varios lanzamientos, por lo que un jugador podría realizar todos sus lanzamientos obteniendo la máxima puntuación, que sería impactar en el centro de la diana. Podríamos decir que este jugador ha sido poco o nada variable en su resultado y que en términos de

rendimiento ha obtenido la máxima puntuación, lo que podría dar lugar a pensar que este mismo jugador podría ser poco variable en su ejecución. Un análisis detallado de las trayectorias, angulaciones o fuerzas aplicadas en cada uno de los lanzamientos mostraría que esa deducción era errónea, pudiendo observarse trayectorias diferentes, distintos ángulos de salida o diferentes fuerzas aplicadas en cada lanzamiento, lo que no tendría por qué implicar una pérdida de rendimiento en el resultado. En este ejemplo, la variabilidad del resultado es referida a la supuesta aleatoriedad que se obtiene durante cada uno de los lanzamientos, donde el lugar de impacto en la diana es diferente para cada uno de ellos. La variabilidad de la fuerza se observa mediante el análisis de las fluctuaciones que son producidas en el sistema neuromuscular durante la sucesión de contracciones musculares producto de la transmisión del impulso, dando origen a diferencias en la aceleración aplicada sobre los segmentos corporales y, por consiguiente, a la velocidad generada en cada uno de los lanzamientos.

El rendimiento motor ha sido tradicionalmente evaluado mediante el análisis de la magnitud de la variabilidad en función a un parámetro externo o relativo al ejecutante, analizando una secuencia de repeticiones de una misma tarea. Dicha magnitud ha sido cuantificada por medio de herramientas de análisis lineal, que ofrecen información sobre la dispersión de los datos en función de la media de la distribución, siendo ésta el promedio de un conjunto de valores ($n_1, n_2, n_3 \dots n_n$), calculada por la suma del conjunto de valores y dividida entre el número de ensayos N (Figura 1a). Para obtener información sobre el grado de dispersión de los datos respecto a un valor promedio, el estadístico más utilizado es la desviación típica de la distribución, análisis que permite evaluar las disminuciones o incrementos de la variabilidad. Este estadístico calcula la raíz cuadrada de la varianza, entendida como varianza el promedio del cuadrado de la distancia de cada punto respecto del promedio (Figura 1b). Otro de los estadísticos utilizados es el coeficiente de variación,

que se calcula como la medida de dispersión relativa de un conjunto de datos relativos a la media de los valores obtenidos (Figura 1c).

$$\begin{array}{lll}
 \text{a)} & & \text{b)} & & \text{c)} \\
 \tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1+a_2+\dots+a_n}{n} & & S = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \tilde{x})^2}{n}} & & CV = \frac{S}{\tilde{x}} \cdot 100\%
 \end{array}$$

Figura 1. Fórmulas utilizadas para el cálculo de la dispersión de los datos. En la figura, (a) representa el cálculo del promedio de las series de datos, (b) la fórmula del cálculo de la desviación típica y (c) la fórmula del cálculo del coeficiente de variación.

Tradicionalmente, se ha considerado que durante el aprendizaje de habilidades motrices se debe tratar de incrementar la eficacia, y por tanto el rendimiento, mediante la reducción de la variabilidad mostrada por el aprendiz. Estos mismos conceptos trasladados al ámbito deportivo, se han utilizado en la búsqueda de un mayor rendimiento, utilizando la práctica y el entrenamiento como un modo de reducir la variabilidad mostrada por los deportistas durante la realización de sus ejecuciones. A pesar de la mejora de rendimiento obtenida por el deportista, los niveles de variabilidad mostrados en cada una de sus ejecuciones no son eliminados completamente. Recientes estudios cuestionan el valor de la variabilidad como clasificador del rendimiento, encontrando mayores niveles de variabilidad en individuos de mayor nivel de rendimiento. Por ejemplo, en un estudio con jugadores de baloncesto, se encontraron valores de mayor variabilidad en el ángulo de lanzamiento en jugadores de baloncesto expertos comparado con jugadores noveles (Miller, 2002). Resultados en la misma línea fueron presentados por Button y col. (2003) en el tiro libre en baloncesto, donde los jugadores de mayor rendimiento mostraban mayor variabilidad en la articulación de la muñeca que los jugadores menos expertos. Este aspecto, entre otros relacionados con el papel funcional que puede tener la variabilidad en el movimiento humano, ha propiciado el estudio de la variabilidad mediante una fundamentación teórica diferente a los postulados procedentes de la teoría de la variabilidad del impulso.

Recientemente, se ha planteado una reformulación a las propuestas de la teoría de la variabilidad del impulso, basadas en la psicología cognitiva. Esta alternativa se fundamenta en la teoría de sistemas dinámicos (TSD), con una gran influencia en la termodinámica (Kelso y Engstrøm, 2006; Kelso, 1995; Prigogine, Stengers y Toffler, 1984) y la psicología ecológica (Davids, Button y Bennett, 2008; Gibson, 1979; Turvey, 1996), con el fin de tratar de explicar los comportamientos y posibles transiciones que puedan ocurrir en un sistema. Desde esta perspectiva, se resta atención a los procesos internos, para dirigir el estudio del comportamiento motor a las relaciones entre la dinámica intrínseca del individuo, las características de la tarea y el entorno en el que se desarrolla, considerando el comportamiento motor en su integridad mediante el estudio global de las interacciones. La introducción de este nuevo punto de vista ha propiciado un cambio en el paradigma de estudio de la variabilidad, dejando de ser considerada como ruido o errores del sistema para ser la cuestión central de estudio, relacionada con la abundancia de grados de libertad del sistema como característica del cuerpo humano (Hernández-Davó y col., 2014; Newell y Corcos, 1993; Sabido, Caballero y Moreno, 2009). Por tanto, desde esta perspectiva, la variabilidad se interpreta como una característica funcional, más allá de su interpretación como errores indeseables del sistema (Davids, Glazier, Araujo y Bartlett, 2003; Newell y Slifkin, 1998; Riley y Turvey, 2002). La variabilidad motora ostentaría un papel favorecedor de la exploración del entorno y, por tanto, de mejora de la organización del sistema y del rendimiento. La literatura científica ha analizado la variabilidad del movimiento humano como el resultado de interacciones no lineales con propiedades y origen deterministas. Tradicionalmente, el azar y el determinismo han sido distinguidos en base a la no predictibilidad de los procesos aleatorios, mientras que los procesos deterministas son predecibles. Sin embargo, existen ciertos tipos de procesos que poseen ambas características aleatorias y deterministas, en las que a pesar de que las trayectorias se rigen por ecuaciones deterministas, las predicciones precisas de los estados futuros son difíciles

o imposibles de lograr (Amato, 1992; Dingwell y Cusumano, 2000; Glass y Mackey, 1988; Gleick, 1997; Harbourne y Stergiou, 2009; Miller, Stergiou y Kurz, 2006; Riley y Turvey, 2002).

1.2 VARIABILIDAD MOTORA Y COMPORTAMIENTO FUNCIONAL: LA PERSPECTIVA DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS DINÁMICOS.

Tal y como se ha introducido en el punto anterior, las nuevas teorías procedentes de la psicología ecológica y la teoría de sistemas dinámicos (TSD) introducen nuevas perspectivas de estudio de la variabilidad del movimiento humano, partiendo de la consideración de los seres vivos como sistemas complejos dinámicos y abiertos. Para abordar esta interpretación haremos una breve introducción sobre las características de la teoría de sistemas dinámicos y los principios que aborda en el estudio de la variabilidad de los sistemas.

1.2.1 *El ser humano como sistema complejo dinámico y abierto.*

Un sistema complejo está compuesto de muchos elementos que interactúan entre sí, dando lugar a diferentes comportamientos observables. Las características que definen a un sistema complejo son extensamente recogidas en la literatura científica.

Hasta la entrada en escena de la teoría del caos y de las herramientas de análisis no lineal, la naturaleza y sus comportamientos han sido explicados a partir de las teorías de Newton sobre las leyes de la gravitación y el movimiento universal. La física newtoniana establecía que la naturaleza está determinada por una sucesión de causas y consecuencias con características lineales y reversibles. Desde esta perspectiva, se estudia la globalidad a partir de cada una de sus partes y de las interacciones entre ellas, conociéndose este procedimiento como “*reduccionismo*”. No obstante, estas teorías tienen lagunas al tratar de estudiar grandes sistemas complejos y sus relaciones, al contemplar su estudio en base a una física lineal reversible sin tener en cuenta la interacción de los sistemas con las

condiciones o elementos del entorno que le rodea. En el siglo XIX, el matemático Henri Poincaré fue el primero en describir que un sistema determinístico exhibe comportamientos irregulares que dependen sensiblemente de las condiciones iniciales, haciendo así imposibles las predicciones a largo plazo (Strogatz, 1994). No obstante, los postulados de Poincaré respecto al caos y la no linealidad no tuvieron especial relevancia hasta la primera mitad del siglo XX, gracias a los avances tecnológicos en el desarrollo de computadoras más potentes, que permitieron experimentar con ecuaciones de una forma imposible de realizar anteriormente, y con ello desarrollar alguna intuición sobre sistemas no lineales. Estos experimentos dirigidos por el meteorólogo Edward Lorenz en 1963, resultaron en el descubrimiento del movimiento caótico en un atractor extraño. Los resultados del experimento de Lorenz, pusieron de manifiesto la extremada sensibilidad de los sistemas no lineales y su especial dependencia sensible de las condiciones iniciales. El conocido como efecto mariposa, refleja cómo los cambios a pequeña escala, pueden influenciar en aspectos de una escala mucho mayor. Todos estos descubrimientos dieron origen a la que actualmente es conocida como la teoría del caos.

En general, se pueden distinguir dos enfoques en los estudios del caos (Hayles, 1990). El primero de ellos se centra en el orden oculto existente en los sistemas caóticos, y el segundo en el surgimiento espontáneo de orden, de auto-organización en las estructuras que surgen en condiciones de alejamiento del equilibrio de los sistemas. Ambos enfoques tienen factores comunes, entre los que destacan los procesos no lineales, sistemas en los que conviven estabilidad e inestabilidad, alejados de la condición de equilibrio. Todos estos términos acuñados anteriormente, se resumen en una teoría denominada comúnmente "Teoría General de *Sistemas Dinámicos Complejos*". La teoría del caos, así como el resto de teorías, permiten una caracterización de la complejidad así como describir las características de un sistema dinámico complejo.

Partiendo de este enfoque, se considera a los sistemas biológicos como sistemas complejos formados por varios elementos que interactúan entre sí e interactúan con su entorno, considerando el comportamiento desde un punto de vista macroscópico más que la suma de sus partes. El ser humano es un sistema complejo, compuesto por numerosos elementos como huesos, articulaciones y músculos, entre otros, interactuando entre sí y con su entorno de manera continua, que además se mueve, se desplaza, coge objetos, los golpea o los lanza produciendo un determinado comportamiento, entendido éste como la interacción de un sistema complejo con sus diferentes elementos o su entorno.

Considerando las características de los sistemas complejos que tienen mayor relevancia en los objetivos y el contenido de esta tesis doctoral, en los puntos que siguen a continuación se detallarán cada uno de los aspectos más significativos que componen un sistema complejo.



Tabla 1. Características de un sistema complejo (Moreno y Ordoño, 2009).

1. Poseen varios grados de libertad, entendiendo éstos como la cantidad de potenciales configuraciones que pueden observarse entre las partes del sistema. La complejidad de un sistema estará marcado por la cantidad de grados de libertad (Newell y Vaillancourt, 2001).
2. El comportamiento de un sistema es potencialmente no lineal, mostrando diferentes formas de relación entre sus componentes.
3. Un sistema puede estar compuesto de varios subsistemas.
4. Los componentes de un subsistema pueden influir o limitar el comportamiento de otros subsistemas.
5. Los patrones de comportamiento del sistema son resultado de la auto-organización entre sus partes y éste comportamiento puede mostrar distintos niveles de estabilidad.
6. Un sistema modifica su estado de organización en función de los parámetros de control de su entorno, esta dependencia de los parámetros de control y la permanencia de los cambios experimentados incluso sin la exposición a éstos se le denomina histéresis del sistema.

1.2.1.1 Auto-organización.

Los sistemas complejos son sistemas abiertos que están en constante intercambio de energía con su entorno y como consecuencia lejos del equilibrio, lo que les confiere la capacidad de adaptación, formando procesos estables de auto-organización, que les permite interactuar con su entorno haciendo emerger comportamientos espontáneos determinados por las condiciones de ese entorno. El concepto de auto-organización es definido como la característica de los sistemas complejos, que facilita la formación espontánea de patrones de comportamiento, permitiendo la aparición de un nuevo estado de equilibrio (Kelso, 2000), y se manifiesta como las transiciones que se producen entre los estados de organización, que surgen como consecuencia de los condicionantes internos o externos a los que son sometidos, y que están presentes en los sistemas complejos (Newell, 1986).

Un ejemplo de auto-organización son los denominados procesos de acoplamiento, y se muestran de manera especial en las interacciones de determinados elementos para formar un único elemento. Estas interacciones pueden verse claramente en la naturaleza, observando por ejemplo el comportamiento de bancos de peces o parvadas de aves durante su desplazamiento sincronizado, mostrando un comportamiento emergente y manifestando la complejidad de los sistemas dinámicos. La complejidad de un sistema se mide por el número de grados de libertad implicados, es decir, la cantidad de potenciales configuraciones que pueden observarse entre sus partes (Newell y Vaillancourt, 2001).

1.2.1.2 *El concepto de no linealidad.*

Otra de las características de los sistemas complejos es la no linealidad del comportamiento de un sistema, que ha sido objetivo de estudio en numerosos trabajos, siendo descrita en el movimiento humano por los trabajos de Kelso, Holt, Rubin y Kugler (1981) y Kelso (1984), posteriormente modelada matemáticamente por Haken, Kelso y Bunz (1985). Los resultados obtenidos de estos trabajos describían la no linealidad de un sistema y la irreversibilidad de los cambios producidos en tareas bimanuales ajustándose a una frecuencia, que aumentaba sistemáticamente durante la prueba con el objetivo de provocar una transición entre dos patrones de coordinación de diferente estabilidad. Una vez provocada la transición entre fases, se revertía la frecuencia de ejecución para que el sistema retornara de nuevo al patrón de movimiento anterior, observándose que a pesar de que la frecuencia disminuía, después de la fase de transición el sistema no vuelve a su estado inicial. A este estado de organización en función de los parámetros de control de su entorno (frecuencia), la dependencia de estos parámetros de control y la permanencia de los cambios experimentados, incluso sin la exposición a éstos, se le denomina histéresis del sistema, siendo ésta otra característica de un sistema complejo.

1.2.1.3 *Los grados de libertad.*

Los trabajos de Bernstein (1967) sobre cómo formular el problema de los sistemas de movimiento para dominar la redundancia de grados de libertad (DOF) de un sistema, sirvieron de inspiración para contextualizar el marco de trabajo de la teoría de sistemas dinámicos en el análisis del movimiento. Bernstein utilizó el término redundancia para hacer referencia a los grados de libertad que exceden del mínimo número requerido para completar satisfactoriamente una tarea motora (Vereijken, Emmerik, Whiting y Newell, 1992). Los grados de libertad de un sistema son definidos por las posibilidades de interacción de los elementos de un sistema entre sí. A mayor posibilidad de interacción, mayor será el número de grados de libertad y, por tanto, mayor complejidad del sistema. A nivel conductual, Bernstein argumentó que los seres humanos tienen la capacidad de eliminar o limitar parte de los grados de libertad, bloqueando articulaciones para restringir la capacidad de movimiento y como consecuencia mejorar el control del movimiento. Una vez controlados los grados de libertad aparecen sinergias musculares como estrategia neural para simplificar el control de múltiples grados de libertad. Las sinergias musculares son definidas como patrones de co-activación de los músculos que son reclutados por la señal emitida por único comando neural (Bernstein, 1967).

1.2.1.4 *Los parámetros de control y de orden.*

Los parámetros de control son definidos como todas las posibles influencias sobre el sistema, que puedan ser alteradas o manipuladas con el fin de producir un cambio en el comportamiento de sus elementos. Por tanto, el sistema tiene un comportamiento dependiente de los parámetros de control del entorno. Los cambios producidos por los parámetros de control provocan la aparición de un nuevo comportamiento destinado a la auto-organización. Esta auto-organización que ha sido generada a partir de la interacción

con el medio y la tarea supone patrones de comportamiento, que son denominados parámetros de orden.

1.2.1.5 *La histéresis.*

La histéresis es una característica que define la dependencia de la progresión de los patrones de comportamiento de un sistema en función de la direccionalidad de los cambios en los parámetros de control, y la persistencia de los cambios aún en la ausencia del parámetro de control. La permanencia de los cambios dependerá en gran medida de la capacidad de resistencia del sistema a los parámetros de control introducidos, así como de la fuerza de los atractores que definan su comportamiento.

1.2.1.6 *Estabilidad y atractores en un sistema dinámico complejo.*

Todos los sistemas tienden a la estabilidad, al equilibrio y al mínimo intercambio energético. El grado de estabilidad de un patrón de comportamiento está definido por su resistencia al cambio. Un parámetro de control provoca el desequilibrio de un sistema, lo que induce al sistema a buscar un nuevo estado de equilibrio, produciendo una nueva interacción con los componentes que lo forman. Por tanto, son necesarias magnitudes altas de parámetros de control para desestabilizar patrones estables. A estos patrones estables de organización que muestra un sistema, y hacia los que éste tiende, se les denomina atractores.

La teoría de sistemas dinámicos ha influido de manera notable en la consideración de la variabilidad motora como un factor funcional del movimiento, aportando nuevas herramientas para el análisis de la variabilidad que han permitido conocer aspectos que hasta ahora permanecían desconocidas.

1.2.2 La variabilidad motora como factor funcional del control y el aprendizaje motor.

Desde la perspectiva de la teoría general de sistemas dinámicos complejos, se considera la variabilidad como un factor funcional y relacionado con diversas manifestaciones del comportamiento humano. Por ejemplo, en el ámbito de la fisiología, la variabilidad está vinculada a la salud de los sistemas biológicos (Goldberger, Findley, Blackburn y Mandell, 1984). Goldberger, Rigney, Mietus, Antman y Greenwald (1988), observaron diferentes patrones de variabilidad en los ritmos cardíacos entre pacientes sanos y enfermos, sugiriendo que un sistema saludable tiene una cantidad de variabilidad inherente. Numerosos trabajos argumentan que la variabilidad motora es un elemento necesario para la funcionalidad de los sistemas y, por tanto, un índice de la habilidad para adaptarse (Adami, Ofria y Collier, 2000; Davids y col., 2003; Goldberger y col., 2002; Lamothe, van Lummel y Beek, 2009; Latash, 1993; Lipsitz, 2002; Newell y Corcos, 1993; Rabinovich y Abarbanel, 1998; Riley y Turvey, 2002).

En el ámbito del movimiento humano, la variabilidad motora también se ha relacionado con la flexibilidad y la adaptación en un entorno en constante cambio (ver Newell y Corcos, 1993). Estos comportamientos flexibles y adaptativos han sido observados en numerosos estudios, donde los sujetos son capaces de incrementar su variabilidad en el movimiento para compensar los cambios que se producen en el entorno donde realizan la acción. Por ejemplo, los corredores de montaña realizan leves alteraciones en el estilo de carrera, incrementando su variabilidad con el fin de compensar los cambios que se producen en los espacios por donde se desplazan, tales como el desnivel del terreno, las diferentes superficies o las condiciones climáticas. Además, las variaciones que se producen en la aplicación de la fuerza en movimientos cíclicos como la marcha o la carrera, podrían ayudar a la prevención de lesiones en el sistema musculo-esquelético, causadas por las constantes

repeticiones de un patrón motor específico (Hamill, Haddad, Li, Heiderscheit y Van Emmerik, 2006).

Scholz y col. (2000) analizaron tiradores de pistola de diferentes niveles, observando que los tiradores expertos mostraban mayores niveles de variabilidad en las articulaciones más mediales (hombros y codos), pero una mayor estabilidad de la muñeca y, por tanto, en la pistola. Estos resultados se manifestaban diferentes en el caso de tiradores noveles o de menor nivel, mostrando una disminución de la variabilidad en las articulaciones mediales, lo que provocaba un incremento en la rigidez del movimiento y una menor estabilidad de la mano. Estos resultados obtenidos por los tiradores expertos están en línea con las interpretaciones de la variabilidad funcional que permite, mediante la liberación de grados de libertad de un sistema, incrementar el rendimiento en una tarea de precisión. Resultados similares fueron obtenidos en jugadores de tenis de mesa en las trayectorias previas al golpeo de la bola, donde los jugadores con mayor nivel de destreza mostraban mayores niveles de variabilidad durante el inicio del movimiento, reduciéndose ésta a la mínima cantidad en el momento de contacto con la bola (Bootsma y Van Wieringen, 1990). Esta reducción se interpretó como una respuesta funcional de los jugadores expertos, con el fin de explorar mejor las posibilidades y adaptarse a las necesidades del golpeo. Mucha variabilidad durante el momento de contacto de la bola provocaría una pérdida de control, comportamiento más frecuente en jugadores noveles y de nivel intermedio (Tyldesley y Whiting, 1975). Davids, Shuttleworth, Button, Renshaw y Glazier (2004), reiteraron en sus investigaciones que la variabilidad mostrada entre ensayos debe interpretarse como una necesidad del sistema de buscar una respuesta acorde a las circunstancias en constante cambio del entorno, entendiendo este comportamiento como propio de una ejecución eficaz. Estudios referentes al desarrollo motor en niños sugerían que la variabilidad mostrada durante una transición en su desarrollo motor, es un prerrequisito para saltar a un nuevo nivel de comportamiento, interpretando la variabilidad como altamente funcional, lo

que proporciona a los niños posibilidades para la exploración y, por tanto, oportunidades para descubrir diferentes soluciones (Thelen y Smith, 1994).

Esta relación con procesos exploratorios y con periodos críticos de aprendizaje ha llevado a algunos autores a relacionar las modificaciones producidas en la variabilidad motora con la voluntariedad, la intencionalidad o la atención a la hora de practicar una tarea. Estudios en tareas de punteo o marcha ajustándose al ritmo marcado por un metrónomo han encontrado resultados en esta línea, donde un estricto control implicaría el bloqueo de grados de libertad con la intención de ajustarse al criterio establecido, sustentando la idea de que la variabilidad del movimiento de las personas es el resultado de un equilibrio entre control involuntario (excesivamente aleatorio) y control voluntario (excesivamente determinístico), que surge durante la ejecución de una tarea en un contexto específico (Kloos y Van Orden, 2010; Van Orden, 2009). La utilización de herramientas de análisis no lineal para el estudio de la variabilidad ha permitido asociar altos valores de entropía con altos niveles de incertidumbre o variabilidad de un sistema (Lai, Mayer-Kress, Sosnoff y Newell, 2005). Borg y Laxåback (2010) planteaban la interpretación del descenso de la entropía como un signo de mayor atención dedicado al equilibrio, lo que implicaría un mayor control voluntario. Estos mismos autores plantean que las respuestas automáticas muestran una mayor entropía en la variabilidad motora y, por consiguiente, el control voluntario disminuiría. Las relaciones entre menor complejidad y cantidad de atención han sido ampliamente estudiadas en el control del movimiento (Donker, Ledebt, Roerdink, Savelsbergh y Beek, 2008; Donker, Roerdink, Greven y Beek, 2007; Roerdink y col., 2006; Schmit y col., 2006; Stins, Michielsen, Roerdink y Beek, 2009). En una línea similar se encuentran los estudios que han abordado la relación entre la complejidad y la intencionalidad. Washburn, Coey y Richardson (2013) analizaron esta relación en una tarea de punteo para identificar los efectos de dos constreñimientos intencionales (amplitud y frecuencia) sobre la estructura de la variabilidad. Los resultados obtenidos mostraron que

el ajustarse a los constreñimientos intencionales afectó sobre la estructura de la variabilidad, desplazándola hacia una estructura similar a ruido blanco, y encontrando diferencias entre ambos constreñimientos en la anti-persistencia obtenida cuando el ajuste era realizado sobre la frecuencia de movimiento. Similares resultados fueron obtenidos por Kuznetsov y Wallot (2011) en tareas de estimación temporal, observando un desplazamiento hacia ruido blanco cuando el participante tenía como intención ajustarse a un parámetro temporal. En los estudios anteriormente mencionados se han afrontado conceptos complejos relacionados con procesos de voluntariedad, acción e intencionalidad, utilizando diferentes términos y bajo diferentes interpretaciones. Según nuestro conocimiento, no se ha establecido hasta la fecha una relación clara entre la estructura de la variabilidad y los procesos de intencionalidad o de implicación en la ejecución de la tarea. Algunos autores interpretan la introducción de feedback de precisión como una forma de reducir las demandas de control voluntario y lo asocian a un comportamiento más impredecible (Delignières y Torre, 2009). Por tanto, las condiciones de una tarea como ajustarse a una diana provocaría como consecuencia una reducción del control voluntario. El concepto de voluntariedad o intencionalidad continúa actualmente en debate (Latash, 2015), y dependiendo de la interpretación, ajustarse a una diana o criterio podría ser interpretado como un acto voluntario e intencionado.

El trabajo presentado en esta tesis doctoral no tiene como intención añadir controversia a este paradigma, sino más bien tratar de ofrecer datos que traten de clarificar la relación de la estructura de la variabilidad con la ejecución motora sometida a determinados constreñimientos. Así mismo, se ofrecerá una interpretación que ayude a una mejor comprensión, tratando de agrupar los diferentes términos utilizados en la literatura, e incidiendo en aquello que todas las definiciones utilizadas tienen como factor en común, que en este caso es la manipulación de los constreñimientos de la tarea y cómo se comporta el sujeto en función de la afectación del nivel de ese constreñimiento. Si, se utilizarán los

términos de magnitud o nivel de constreñimiento y se estudiará la relación de la manipulación de la magnitud o el nivel del constreñimiento con las características de la variabilidad, su magnitud y su estructura. Así, el objetivo de esta tesis doctoral será abordar la relación entre las dinámicas no lineales de la variabilidad mostrada por los participantes en una tarea de punteo, y los efectos de la manipulación de los constreñimientos de la tarea sobre el comportamiento mostrado por los participantes.

Antes de abordar con mayor detalle el problema de investigación, y dado que uno de los elementos a tratar será la diferenciación entre la estructura y la magnitud de la variabilidad, se presentarán algunas de las consideraciones acerca de las herramientas de análisis de la variabilidad motora. Gran parte de la discusión y las diferencias encontradas en los distintos trabajos han sido en ocasiones justificadas por el uso de distintos estadísticos o procedimientos de análisis de los datos procedentes de la variabilidad. Por tanto, en el punto siguiente se introducirán las herramientas no lineales que habitualmente han sido utilizadas en la literatura científica para analizar la variabilidad motora, así como sus principales aplicaciones.

1.3 EL ANÁLISIS LA VARIABILIDAD MOTORA: HERRAMIENTAS Y APLICACIONES.

Tal y como se ha introducido anteriormente, tradicionalmente, la variabilidad ha sido medida mediante el uso de herramientas lineales (promedio, desviación típica, y coeficiente de variación), que proporcionaban valores sobre la magnitud del cambio respecto a un punto central o criterio. Sin embargo, este tipo de herramientas obvian cómo la variabilidad del movimiento evoluciona en el tiempo (Stergiou y Decker, 2011) y enmascaran por tanto características sobre las dinámicas temporales de la variabilidad y su estructura. Nuevos enfoques teóricos sugieren que la variabilidad contiene información relevante sobre el movimiento (Amato, 1992; Cavanaugh y col., 2005; Harbourne y Stergiou, 2009; Newell y Corcos, 1993), aspecto que ha propiciado el desarrollo y uso de nuevas herramientas que

permitan describir las diferentes características de la variabilidad, su estructura temporal y su complejidad.

Numerosos estudios han utilizado este tipo de herramientas no lineales para analizar la variabilidad desde esta perspectiva (Borg y Laxåback, 2010; Bruijn, Bregman, Meijer, Beek y van Dieen, 2012; Buzzi, Stergiou, Kurz, Hageman y Heidel, 2003; Cavanaugh, Kochi y Stergiou, 2010; Delignières y Torre, 2009; Ramdani, Tallon, Bernard y Blain, 2013; Stergiou y col., 2006). La incorporación de nuevas metodologías de análisis de la variabilidad ha ofrecido resultados en direcciones opuestas, mostrando que cambios en las medidas de cantidad de variabilidad pueden dirigirse en distinta dirección cuando esos mismos cambios son medidos con herramientas que evalúan la estructura de la variabilidad (Harbourne y Stergiou, 2009). En este sentido, los trabajos de Newell y Slifkin (1998) en el estudio del control postural, y de Balasubramaniam, Riley y Turvey (2000) en el análisis de las relaciones de magnitud y estructura de la variabilidad de la fuerza, encontraron resultados en este mismo sentido, mostrando que cuando las medidas de cantidad de variabilidad aumentaban, las medidas de estructura de variabilidad decrecían.

En los últimos años, son considerables las herramientas desarrolladas para evaluar la complejidad de los sistemas biológicos y sus diferentes características temporales (Seely y Macklem, 2004). Entre las herramientas frecuentemente utilizadas para el análisis de la regularidad podemos destacar el Análisis de Recurrencia (en adelante *Recurrence Quantification Analysis, RQA*). Los sistemas dinámicos tienen una propiedad fundamental que es su estado recurrente, siendo esta típica de los sistemas no lineales y caóticos (Zbilut y Webber, 2006). Esta herramienta indica el número de veces que los datos son recurrentes entre sí en función de un umbral de tolerancia indicado, representando los datos en función al número de veces que coinciden esos valores y calculando la proximidad de los puntos en un mapa de recurrencia que contiene todas las trayectorias posibles de un sistema (Ramos-Villagrasa y García-Izquierdo, 2011). Esta herramienta ha sido utilizada en el

análisis del comportamiento en tareas de precisión (Wijnants, Bosman, Hasselman, Cox y Van Orden, 2009), el control postural (Riley, Balasubramaniam y Turvey, 1999) y análisis de la frecuencia cardíaca (Marwan, Wessel, Meyerfeldt, Schirdewan y Kurths, 2002; Zbilut, Thomasson y Webber, 2002).

La estabilidad dinámica de un sistema y su dependencia de las condiciones iniciales ha sido comentado como uno de los factores claves a la hora de analizar las características de un sistema complejo (Buzzi y col., 2003), siendo el Exponente de Lyapunov (en adelante *Lyapunov Exponents*, *LyE*) (Wolf, Swift, Swinney y Vastano, 1985) una de las más utilizadas. Las trayectorias convergentes se muestran en valores negativos de *LyE* y representan la estabilidad en una dirección particular. Por el contrario, valores positivos de *LyE* muestran una divergencia de las trayectorias, representando la inestabilidad local en una particular dirección (Eckmann y Ruelle, 1985). El *LyE* ha sido utilizado para evaluar el equilibrio durante la marcha (Buzzi y col., 2003; Franz, Francis, Allen, O'Connor y Thelen, 2015; Smith, Stergiou y Ulrich, 2011), el control postural (Cignetti, Kyvelidou, Harbourne y Stergiou, 2011; Donker y col., 2007) y trastornos mentales (Abe, Chen y Pham, 2014). Algunos autores han sugerido la necesidad de validar este método (Dingwell y Cusumano, 2000) y para ello surge el análisis de Surrogación (*Surrogation analysis*). Esta técnica consiste en comparar la señal original con señales aleatorias creadas a partir de la original, siendo estas equivalentes en media, variación y espectro de frecuencia a la señal original (Theiler, Eubank, Longtin, Galdrikian y Farmer, 1992). Obtenidas las series temporales aleatorias se calcula su *LyE*, siendo comparada posteriormente con la señal original. La existencia de diferencias significativas tras la comparación de ambos *LyEs* (original y aleatorias) son interpretados como características deterministas y por consiguiente una estructura caótica (Buzzi y col., 2003; Harbourne y Stergiou, 2003; Stergiou, 2004). La combinación de ambas técnicas, caracterizaría el estado del sistema hacia un sistema periódico, caótico o aleatorio. No obstante, algunos autores han cuestionado este tipo de

herramientas de análisis, argumentando la falta de relación entre la regularidad de una señal y la complejidad de un sistema dinámico (Goldberger, Peng y Lipsitz, 2002; Stergiou y col., 2006).

Entre las herramientas más utilizadas en la literatura, y más próximas a nuestro objeto de estudio, se pueden encontrar las medidas de entropía que evalúan los grados de irregularidad del sistema, siendo la Entropía Aproximada (en adelante *Approximate Entropy*, *ApEn*) una de las primeras herramientas desarrolladas para analizar la complejidad del sistema (Pincus, 1991). Numerosos trabajos la han utilizado para analizar la regularidad de las señales biofisiológicas (Mäkikallio y col., 1998; Pincus, 1995; Rezek y Roberts, 1998), así como la afectación sobre la regularidad de las señales del centro de presiones (*CoP*) en tareas de control postural y equilibrio, relacionándola con la presencia del envejecimiento o patologías existentes (Cavanaugh, Mercer y Stergiou, 2007; Deffeyes y col., 2009; Haran y Keshner, 2008; Ladislao, Rabini, Ghetti y Fioretti; Stergiou y col., 2006).

A la vista de la inconsistencia de *ApEn* por el proceso de cálculo y por su dependencia a la longitud de la serie, se desarrolló una nueva herramienta en base al mismo modelo matemático conocida como Entropía Muestral (en adelante *Sample Entropy*, *SampEn*) (Richman y Moorman, 2000) que solventa la dependencia de los resultados a la longitud de la serie, induciendo a una mayor consistencia de los resultados. Al igual que su predecesora, numerosos trabajos han utilizado esta herramienta para analizar la regularidad de las series temporales (Donker y col., 2007; Hauge, Berle, Oedegaard, Holsten y Fasmer, 2011; Lake, Richman, Griffin y Moorman, 2002; Richman y Moorman, 2000; Roerdink y col., 2006; Santarcangelo y col., 2009; Stins y col., 2009). En el estudio de Borg and Laxåback (2010) discutían dos interpretaciones controvertidas sobre los resultados obtenidos en valores de entropía obtenidos con *SampEn* en el análisis del *CoP*. Por un lado, planteaban los valores de irregularidad y alta entropía como un signo de un sistema saludable en constante exploración del espacio que le rodea, y preparado para

adaptarse a posibles situaciones inesperadas. Por el contrario, esta misma irregularidad y alta entropía puede ser interpretada como signos de que un sistema está perdiendo su estructura, convirtiéndose así en un sistema menos sostenible en proceso de deterioro. De trabajos que han estudiado este tópico emergen dos hipótesis claramente definidas:

- Menores valores de entropía equivalen a una mayor atención y, por tanto, a una señal menos compleja.
- Valores altos de entropía indican un menor requerimiento de atención.

En esta línea emergen diferentes estudios que tratan de relacionar descensos en los valores de entropía con signos de mayor atención durante la realización de una tarea, lo que provoca una regularización del *CoP*, concluyendo que las respuestas automáticas o el control automático incrementa los niveles de entropía, mientras que el control voluntario disminuye (Borg y Laxåback, 2010; Donker y col., 2007; Roerdink y col., 2006; Roerdink, Hlavackova y Vuillerme, 2011b; Stins y col., 2009). Sin embargo, esta herramienta seguía mostrando algunas dificultades para el análisis de la regularidad, propiciando la creación de una nueva herramienta que permitiera cubrir las necesidades de los investigadores. Chen, Wang, Xie y Yu (2007) desarrollaron la Entropía Borrosa (en adelante *Fuzzy Entropy*, *FuzzyEn*), en base a cálculos matemáticos diferentes que hacían el cálculo de entropía más preciso, calculando ésta a través de su forma y no de sus coordenadas, lo que la convierte en una herramienta más conveniente y potente en series temporales de corta duración. En base a estas mejoras, diversos autores la han utilizado para el análisis de las señales biofisiológicas (Barbado, Sabido, Vera-Garcia, Gusi y Moreno, 2012; Kumar, Dewal y Anand, 2014; Li y col., 2013; Liu y col., 2013). Barbado y col. (2012) utilizaron esta herramienta (*Fuzzy Entropy*) para evaluar la complejidad de las series temporales del *CoP* en diferentes situaciones de estabilidad, observando que una alta complejidad postural en condición estable correlacionaba con una pérdida menor de rendimiento ante una situación inestable, concluyendo así que valores altos de complejidad en el control postural en

situación estable podrían ser una muestra de la capacidad del sistema para adaptarse a posibles situaciones de inestabilidad.

Algunos autores cuestionan el uso de estas herramientas a pesar de las mejoras producidas en las diferentes medidas de entropía, argumentando que los algoritmos utilizados por estas herramientas están basados en una única escala, sin tener en cuenta las múltiples escalas temporales inherentes en los sistemas fisiológicos (Costa, Goldberger y Peng, 2002, 2005). Estos mismos autores proponían la utilización de una nueva herramienta la Entropía Multiescala (en adelante *Multiscale Entropy, MSE*) que trataba de solventar este aspecto con la cuantificación de una señal a través de múltiples escalas temporales. Esta herramienta no lineal ha sido utilizada en el análisis de señales biológicas (Costa, Goldberger y Peng, 2005; Thuraisingham y Gottwald, 2006) como frecuencia cardíaca (Costa, Goldberger y Peng, 2002; Costa, Peng y Goldberger, 2008; Norris, Anderson, Jenkins, Williams y Morris Jr, 2008), señales de un encefalograma (*EEG*) en pacientes con patología (Escudero, Abásolo, Hornero, Espino y López, 2006; Park, Kim, Kim, Cichocki y Kim, 2007), análisis de la marcha (Costa, Peng, Goldberger y Hausdorff, 2003) y control postural (Duarte y Sternad, 2008).

En la misma línea, otra de las herramientas utilizadas para el análisis de la regularidad es la Entropía de Permutación (en adelante *Permutation Entropy, PE*) (Bandt y Pompe, 2002), que evalúa la frecuencia en la que aparecen patrones de permutación a lo largo de las series temporales, mostrando gran robustez al ruido y al tamaño de las series de datos. Esta herramienta ha sido utilizada especialmente en el análisis de las señales cerebrales (*EEG*) en pacientes con epilepsia (Bruzzo y col., 2008; Cao, Tung, Gao, Protopopescu y Hively, 2004; Nicolaou y Georgiou, 2012), los efectos del fármaco utilizado en la anestesia sobre el EEG (Kreuzer, Kochs, Schneider y Jordan, 2014; Olofsen, Sleight y Dahan, 2008), análisis de la frecuencia cardíaca (Bian, Qin, Ma y Shen, 2012; Frank, Pompe, Schneider y Hoyer, 2006), y la variabilidad del movimiento humano (Rathleff, Samani, Olesen, Kersting

y Madeleine, 2011) quienes analizaban las relaciones entre la complejidad de la pisada y la activación muscular en pacientes con síndrome de estrés tibial.

Desde otras aproximaciones, para evaluar la complejidad de la variabilidad del movimiento, se ha utilizado el análisis del rango de auto-correlación de una señal. La auto-correlación examina la relación de los valores de una serie temporal en diferentes fases temporales para encontrar periodicidad dentro de la señal, y es definida por el parámetro α , que representa las propiedades de correlación de la señal. Estas propiedades pueden mostrar diferentes valores que indicarían la tendencia de la serie temporal. Valores de $\alpha > 0.5$ implican que la trayectoria tendería a continuar en su dirección actual y que incrementos en los valores son susceptibles de ser seguidos por nuevos aumentos y viceversa; o por el contrario, anti-persistencia con valores de $\alpha < 0.5$ que implicaría una tendencia de la trayectoria a volver de dónde procedió. Valores de $\alpha > 1$ implican que una señal no es estacionaria, en la que su frecuencia oscila en el tiempo y valores de $\alpha = 0.5$ implica una señal no correlacionada, lo que significa que los valores grandes son más propensos a ser seguidos por valores pequeños y viceversa (Bahar y col., 2001; Bashan, Bartsch, Kantelhardt y Havlin, 2008; Eke, Herman, Kocsis y Kozak, 2002; Santhanam, Bandyopadhyay y Angom, 2006).

Las particularidades de la autocorrelación con valores de $\alpha = 1$ han sido asociadas a las características fractales de una serie temporal, debido a que su apariencia y la manera en que se distribuye estadísticamente no varían, aún, cuando se modifique la escala empleada en la observación. La escala fractal o $1/f$, también denominado ruido rosa, es referida a los patrones de la variabilidad del comportamiento que están auto-correlacionados, de manera que las variaciones observadas al inicio del comportamiento se correlacionan con las variaciones que se producen posteriormente en el mismo.

Numerosos procesos fisiológicos y de comportamiento exhiben dinámicas fractales, lo que significa que los patrones de medición de cambio a lo largo de la serie temporal exhiben ciertas propiedades, incluyendo la auto-similitud y la escala (Lebovitch y Shehadeh, 2005). La auto-similitud hace referencia a que los patrones de las fluctuaciones de la serie temporal completa son similares a la estructura mostrada en una porción de la serie temporal. La escala es referida a que las medidas de los patrones (tales como la cantidad de variabilidad presente) dependen de la resolución o la escala de tiempo en el que se han sido medidas. Algunos autores han interpretado valores de autocorrelación de la señal como una respuesta típica de los sistemas complejos saludables, que son caracterizados por propiedades esenciales de robustez y adaptabilidad. Por el contrario, el envejecimiento y la enfermedad parecen marcados por una pérdida de complejidad que normalmente está asociada a una disminución de la autocorrelación en las series de datos (Goldberger, Peng y Lipsitz, 2002; Hausdorff y col., 1997).

Algunos organismos biológicos manifiestan unas variaciones que no responden a ruido blanco sino a ruido rosa, presentando unas variaciones que además de oscilar a corto plazo, oscilan también de manera distinta a largo plazo, siendo reducible dentro de cada segmento de la señal, interpretada como procesos de auto organización derivados de esas variaciones en función de un factor externo. Estas fluctuaciones aleatorias y periódicas definen la complejidad de un sistema, donde los procesos no lineales y sus comportamientos no son deterministas. Así, " la complejidad " es definida como el número de componentes del sistema y sus funciones de acoplamiento (interacción) entre ellos (Newell y Vaillancourt, 2001).

Una de las herramientas más utilizadas en el análisis del rango de autocorrelación de una serie temporal ha sido el Análisis de Fluctuaciones sin Tendencias (en adelante *Detrended Fluctuation Analysis, DFA*), aplicado en numerosos estudios en tópicos de ciencias de la salud (Dutta, Ghosh y Chatterjee, 2013; Ellyett y col., 2014; Ho y col., 2011;

Iyengar, Peng, Morin, Goldberger y Lipsitz, 1996; Kirchner, Schubert, Liebherr y Haas, 2014; Laitio y col., 2000; Mäkikallio y col., 1999; Peng y col., 2002; Penzel, Kantelhardt, Grote, Peter y Bunde, 2003; Tapanainen y col., 2002; Toweill, Sonnenthal, Kimberly, Lai y Goldstein, 2000; Toweill y col., 2003; Tsuji y col., 2013; Varela, Jiménez y Fariña, 2003; Viswanathan, Peng, Stanley y Goldberger, 1997; Zhang y col., 2013). Los ritmos biológicos son la respuesta de sistemas complejos con múltiples procesos de interacción. El análisis de la variabilidad de los ritmos generados por diversas funciones en el organismo humano ha revelado la presencia de una persistente auto-correlación, con una distribución temporal similar a la estructura del denominado ruido rosa (Torre y Delignieres, 2008).

El ruido rosa parece estar relacionado con una dinámica funcional de los sistemas biológicos (Van Orden, Kloos y Wallot, 2011), siendo la característica más prominente durante la realización de una tarea simple en la que se repiten idénticos ensayos (Gilden, 1997). Sin embargo, los patrones cambian con tareas que implican mayor dificultad, disminuyendo los valores de autocorrelación, con señales más similares al ruido blanco a medida que aumenta la dificultad (Clayton y Frey, 1997; Correll, 2008; Kello, Beltz, Holden y Van Orden, 2007; Ward, 2002). La estructura de ruido rosa se ha relacionado con comportamientos saludables (Van Orden y col., 2011) en diferentes tareas de movimiento humano tales como *tapping* (Delignieres, Torre y Lemoine, 2008; Kello y col., 2007; Torre, Balasubramaniam y Delignieres, 2010) respuesta a estímulos (Holden, Choi, Amazeen y Van Orden, 2011) control postural (Schmit, Regis y Riley, 2005; Schmit y col., 2006) marcha (Hausdorff, 2007) y comportamiento del movimiento de los ojos (Coey, Wallot, Richardson y Van Orden, 2012). Alejamientos de esta estructura hacia ruido blanco o marrón se han identificado con un comportamiento típico en edades avanzadas o con la aparición de enfermedades (Beckers, Verheyden y Aubert, 2006; Duarte y Sternad, 2008; Glass y Mackey, 1988; Hausdorff y col., 1997; Lin, Seol, Nussbaum y Madigan, 2008; Norris, Marsh, Smith, Kohut y Miller, 2005; Thurner, Mittermaier y Ehrenberger, 2002; Varela y col., 2003)

como el Parkinson, que es tipificado por una pérdida de flexibilidad en las dinámicas de la estructura (Bartsch y col., 2007; Hausdorff y col., 2007).

Algunos autores relacionan el control voluntario, y por tanto la intencionalidad, con el ruido rosa, planteando su interpretación como un signo de adecuada auto-organización del sistema (Kloos y Van Orden, 2010; Van Orden, 2009). Se reconoce que la intencionalidad conlleva una capacidad de llevar un comportamiento a emerger, permitiendo así todas las actividades humanas. No obstante, el rol que adquiere la intencionalidad es aún cuestión de debate en los foros científicos que tratan de clarificar el papel que juega en el movimiento humano. Uno de los principales motivos radica en que la intención de un participante permanece oculta, y sólo él mismo puede tener acceso a la intención que hay tras la realización de una misma acción (Pereira-Fariña, 2008, 2009). Por tanto, la única forma de ser observada por un observador externo es por vía indirecta mediante el examen de las acciones, quedando este aspecto con un alto componente de interpretación. Desde esta perspectiva, la intencionalidad adquiere un rol de gran importancia que debería ser tomado en cuenta durante los procedimientos de tomas de datos y experimentos llevados a cabo en los laboratorios o entornos ecológicos, aspecto que habitualmente es sistemáticamente ignorado (Vollmer, 2001).

Recientes trabajos han tratado de analizar los cambios en la estructura de la variabilidad del movimiento, identificando cambios en las condiciones de la tarea (Kuznetsov y Wallot, 2011; Washburn y col., 2013). Algunos autores proponen interpretar las intenciones como constreñimientos ya que ambas son de la misma naturaleza y deberían tener las mismas consecuencias (Van Orden y col., 2011). El nivel de los constreñimientos introducidos en la configuración de la tarea, parecen ser directamente predictivos de la estructura de la variabilidad mostrada, por lo que la introducción de grandes constreñimientos provocaría una modificación de la señal hacia ruido blanco y, por el contrario, las tareas con menor constreñimiento o la ausencia del mismo provocarían un

desplazamiento hacia ruido rosa (Chen, Ding y Kelso, 2001; Delignières y Torre, 2009). Así, constreñimientos en el contexto de una tarea específica, proporcionan un control externo y como consecuencia la pérdida de voluntariedad, mientras que la ausencia de constreñimientos durante esa misma tarea, requiere la implicación de participante mediante un control voluntario adicional (Orden, 2009). En este sentido, la introducción de feedback de precisión durante la ejecución de una tarea provocaría la aparición de un condicionante, que implica la aparición de procesos de corrección que se caracterizan como anti-persistentes y una forma de reducir las demandas del control voluntario (Delignières y Torre, 2009).



2 ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.

2.1 *Problema de investigación.*

Realizando un breve resumen de los puntos planteados con anterioridad, la variabilidad como característica inherente en los sistemas biológicos y en especial en el movimiento humano, ha sido habitualmente evaluada mediante el uso de herramientas lineales que han ofrecido información sobre la magnitud de los cambios respecto a un valor criterio. No obstante, la aparición de nuevas técnicas estadísticas ha permitido a la comunidad científica examinar aspectos más complejos del comportamiento humano. El uso de nuevas herramientas no lineales, tal y como se ha planteado en la introducción, incorpora nuevas variables de análisis que ofrecen una visión diferente de las herramientas estadísticas tradicionales, aportando una visión dinámica que revela una fuerte relación entre las personas y su entorno (Holden, Van Orden y Turvey, 2009). Estas nuevas técnicas estadísticas permiten a los investigadores revelar la estructura de la variabilidad del movimiento e indagar en las características del comportamiento motor (Delignières y Marmelat, 2013; Gilden, 1997; Ihlen, 2012).

Una cuestión de base al respecto de la relación entre la estructura de la variabilidad y el control del movimiento sigue siendo tema de debate en la comunidad científica, de manera que ¿cuál sería la herramienta o procedimiento metodológico que permitiría medir mejor la estructura de la variabilidad y la relación con su papel funcional?

En la literatura científica, tal como se ha planteado en la introducción, se recogen diversas herramientas y metodologías para medir diferentes características de la variabilidad. La combinación de herramientas y metodologías ha proporcionado numerosos resultados en diversas direcciones, lo que suscita grandes dudas en el momento de seleccionar cuál de ellas podría responder mejor a la pregunta planteada. No obstante, se

sigue encontrando controversia en la interpretación de resultados, mostrándose direcciones opuestas que podrían ser consecuencia del tipo de procedimiento utilizado, la herramienta seleccionada o, por otro lado, las características de la propia tarea. En este sentido, la relación existente entre complejidad y rendimiento ha sido cuestionada tanto por la propia relación entre ambas, como por las herramientas que se han utilizado para medir la complejidad. Rhea y col. (2011) analizaron el comportamiento de diferentes herramientas que analizan la complejidad (*ApEn*, *SampEn* y *RQA*) manipulando la frecuencia de muestreo (500, 333, 250, 200 y 166Hz) para evaluar las fluctuaciones del *CoP* en adultos. Los resultados mostraron diferencias entre las tres herramientas, observándose menores valores en *ApEn* cuando se utilizó una frecuencia de muestreo alta (500Hz), y estas diferencias no se observaron en el resto de frecuencias utilizadas. No obstante, el análisis mediante *SampEn* mostró un incremento significativo de los valores a medida que la frecuencia disminuía. *RQA* contrariamente, incrementó sus valores significativamente a medida que la frecuencia de registro incrementó. En un estudio reciente, las variaciones del *CoP* fueron analizados mediante herramientas que analizaban la magnitud de la variabilidad (desviación típica y media cuadrática) y herramientas que analizaban su estructura (*DFA* y *SampEn*) en diferentes frecuencias de registro, así como utilizando o no filtrados de las series temporales. Los resultados mostraron que las técnicas utilizadas en el procesamiento de los datos no influyeron en la magnitud de la variabilidad, pero por el contrario sí influyeron en la medida de su estructura (Rhea, Kiefer, Wright, Raisbeck y Haran, 2015). Estos resultados soportan la idea de que la frecuencia de muestreo, el tamaño de las series temporales, así como el filtrado de los datos puede influir en los resultados obtenidos en el análisis de la complejidad en función de la herramienta utilizada. Igualmente, la relación entre complejidad y rendimiento puede estar influida por las condiciones en las que se realiza la tarea, así como por los diferentes condicionantes, tanto de la propia tarea

(Balasubramaniam y col., 2000; Ramenzoni, Davis, Riley, Shockley y Baker, 2011) como del sujeto o el entorno donde se desarrolla.

El objetivo de esta tesis es aportar nuevas evidencias acerca del dilema de los efectos de la magnitud del constreñimiento sobre el comportamiento y su posible interpretación en función de la estructura de su variabilidad.

En el caso de una tarea de precisión como la que nos ocupa, se ha encontrado que diversas variables como la existencia de una referencia externa espacial como una diana (Romero, Coey, Beach y Richardson, 2013) o una referencia temporal (Kuznetsov y Wallot, 2011), pueden ser un factor determinante en la relación entre complejidad y rendimiento, modificando la estructura de la variabilidad en función de los constreñimientos introducidos. Algunos trabajos en esta línea recogen resultados sobre cómo la variabilidad en el comportamiento puede estar influenciada por la naturaleza de la tarea y los diferentes condicionantes, provocando desplazamientos en la estructura de la señal desde aleatoria a más determinística o, por el contrario, desde determinística hacia más aleatoria (Kloos y Van Orden, 2010). No obstante, la dirección específica de los cambios en la variabilidad no ha sido todavía totalmente entendida, por lo que se plantean necesarios estudios adicionales. En esta línea, Kuznetsov and Wallot (2011) obtenían resultados referentes al efecto sobre la estructura de la señal de la aplicación de feedback de resultado durante una tarea de estimación temporal, observando un desplazamiento desde valores cercanos al ruido rosa hacia valores cercanos al ruido blanco cuando los participantes recibían feedback, volviendo a cambiar desde el ruido blanco hacia el ruido rosa cuando el feedback decrecía. Estos resultados están en consonancia con los obtenidos en otros trabajos en la misma línea (Delignieres, Lemoine y Torre, 2004; Gilden, 1997; Lemoine, Torre y Didier, 2006).

Para esta tesis se ha tenido en consideración algunos trabajos de nuestro grupo de investigación que no forman parte de esta tesis, pero que sirven de base teórica para

seleccionar qué herramientas permiten caracterizar mejor la estructura de la variabilidad y su complejidad (Caballero, Barbado y Moreno, 2013; Caballero, Barbado y Moreno, 2014; Caballero, Barbado y Moreno, 2015). En los trabajos anteriormente referidos se analizaron series temporales y se utilizaron diferentes herramientas en tareas de control postural con el fin de observar cuáles de ellas caracterizaban mejor su estructura. En ese sentido, para el análisis de la complejidad de los datos de esta tesis se optará por la utilización de la herramienta *Fuzzy Entropy* para el análisis de la entropía de las series temporales, por su menor dependencia sobre el tamaño de las series temporales y su mayor robustez al ruido, así como su demostrada consistencia relativa y su buena fiabilidad (Caballero y col., 2015). También se optará por la utilización de *DFA* para el análisis de la auto-correlación de las series temporales, habiendo demostrado esta herramienta una adecuada consistencia y fiabilidad (Caballero y col., 2015).

Actualmente, algunos autores plantean la interpretación de los resultados de la estructura de la variabilidad en función de la regularidad o auto-correlación de las series temporales obtenidas tras la manipulación de los constreñimientos de la tarea. Trabajos relacionados con el control postural sugieren la existencia de requisitos intencionales para mantener un control postural óptimo, siendo éstos dependientes de la tarea, la edad y el nivel de habilidad del participante (Woollacott y Shumway-Cook, 2002). Roerdink, Hlavackova y Vuillerme (2011a), estudiaron el control postural en jóvenes adultos en posición sentada y de pie, analizando la regularidad de las trayectorias del *CoP* mediante la utilización de entropía muestral. En este trabajo, encontraron una menor regularidad en las fluctuaciones del *CoP* en la situación sentado que en posición de pie. En el mismo sentido, Donker y col. (2007) estudiaron la regularidad del *CoP* en jóvenes adultos sanos que fueron analizados en tareas de control postural con los ojos abiertos y cerrados, comparando ambas situaciones en tareas simples con el objetivo de mantener la posición lo más estable posible. Posteriormente, establecieron una tarea de memorización con el

objetivo de manipular el foco atencional. Los resultados obtenidos al comparar las condiciones de pie con ojos abiertos y ojos cerrados mostraron una mayor regularidad en la tarea con los ojos cerrados. La manipulación de la situación en la que se realizaba la tarea, introduciendo una tarea de memorización durante la ejecución para reducir el foco atencional durante la ejecución, provocó una menor regularidad de las fluctuaciones del *CoP* (Borg y Laxåback, 2010; Donker y col., 2007; Roerdink y col., 2011a; Stins y col., 2009). El nivel de habilidad ha sido estudiado en tareas de control postural comparando las fluctuaciones del *CoP* de dos grupos de jóvenes, uno de bailarines y otro de no bailarines que debían mantener el equilibrio durante un periodo de tiempo con los ojos abiertos y con los ojos cerrados (Stins y col., 2009). Los resultados mostraron una menor regularidad de los bailarines comparado con los no bailarines. Estos resultados sugieren una menor afectación de los constreñimientos de la tarea en los expertos derivado de su mayor habilidad en tareas de control postural.

Revisados ciertos aspectos sobre las características de la variabilidad y su estructura y vista la gran controversia existente, esta Tesis Doctoral tiene como objetivo principal abordar algunas de las limitaciones recogidas en la literatura científica y responder a las cuestiones que se presentan a continuación:

1. La primera de las cuestiones hace referencia a la relación existente entre la complejidad de la variabilidad analizada mediante el uso de las herramientas no lineales y el rendimiento. Los resultados obtenidos serán tratados desde dos perspectivas: a) análisis inter-sujetos para evaluar si aquellos que tienen mayor complejidad en las variables analizadas tienen mayor rendimiento en las tareas; y b) análisis intra-sujetos para comprobar si la complejidad en la variabilidad varía en relación con la variación de su rendimiento.

2. La segunda cuestión que nos planteamos es el análisis de la complejidad de la variabilidad y cómo ésta puede verse afectada por las condiciones de ejecución de una habilidad. Se examinará cómo la introducción de una referencia externa afecta a la estructura de la variabilidad. Esta referencia, en forma de diana, se relacionará con un comportamiento condicionado que permitirá reconocer el nivel de afectación provocado sobre el individuo al tratar de realizar el movimiento y dirigiendo, en este caso, su mano hacia la diana. En la literatura científica se recoge algunos trabajos en los que se introducen referencias externas en tareas de ajuste temporal, aunque existen escasos estudios que evalúen la relación sobre la variabilidad en tareas de ajuste espacial.
3. Por último, la introducción de la diana como un objetivo o un referente externo que condicione la ejecución la tarea puede no suponer un claro constreñimiento que afecte al comportamiento del participante durante la ejecución del movimiento. Para incrementar el nivel de constreñimiento de la situación, se propondrá la introducción de un refuerzo externo o recompensa, con tres niveles de manipulación. Esto provocará una situación adicional en la que se manipulen las condiciones de la tarea para intensificar la implicación del participante en la práctica. Se espera que estos resultados permitirán extraer información relevante para determinar si los efectos provocados por la manipulación de los constreñimientos durante la realización de la tarea puede examinarse en base al análisis de la estructura de su variabilidad, aspecto que podría ser de gran relevancia en los procesos de aprendizaje y control del movimiento.

Planteados los puntos anteriores y con la obtención de los resultados de la situación experimental, se discutirán los resultados con el objetivo de determinar cómo las características de la variabilidad y su estructura durante la ejecución de una tarea pueden verse condicionadas por la aplicación de diferentes condicionantes y cómo se podría

cuantificar de una forma objetiva el efecto de la manipulación de los constreñimientos durante la realización de una tarea. Este problema de investigación se plasma de forma detallada en los siguientes objetivos e hipótesis del estudio.

2.2 *Objetivos.*

- I. Analizar y describir las características de la magnitud de la variabilidad durante la realización de tareas cíclicas de punteo.
- II. Analizar y describir la estructura de la variabilidad motora humana mediante la utilización de herramientas no lineales.
- III. Analizar el efecto de los diferentes niveles de constreñimiento de la ejecución de la tarea (sin diana, con diana y con diferentes niveles de recompensa) sobre la magnitud de la variabilidad.
- IV. Analizar el efecto de los diferentes niveles de constreñimiento de la ejecución de la tarea sobre las dinámicas no lineales de la variabilidad motora.
- V. Analizar la evolución temporal, tanto de la estructura como de la magnitud de la variabilidad motora, en una tarea cíclica de punteo a lo largo del tiempo de ejecución, y cómo esta evolución puede verse afectada por los constreñimientos de la tarea.
- VI. Identificar el grado de relación entre las variables de rendimiento y la complejidad mostrada por la estructura de su variabilidad, así como evaluar el efecto provocado por los constreñimientos de la tarea.

2.3 Hipótesis.

H1: El rendimiento en una tarea cíclica de punteo estará relacionado con la estructura de la variabilidad mostrada, de forma que un mayor rendimiento en la tarea conllevará una estructura de la variabilidad del resultado más irregular y menos autocorrelacionada.

H2: La introducción de un constreñimiento que afecte sobre el rendimiento en una tarea motora cíclica afectará a la estructura de la variabilidad mostrada en el rendimiento.

H2.1: La inclusión de una diana en la habilidad de punteo supondrá un mayor nivel de constreñimiento de la tarea, y provocará una reducción en la magnitud de la variabilidad del resultado de la acción.

H2.2: La inclusión de una diana en la habilidad de punteo modificará la estructura de la variabilidad del resultado de la acción, mostrando una oscilación ensayo a ensayo más irregular y menos autocorrelacionada.

H2.3: La aportación de recompensas en la tarea, manteniendo presente la diana, incrementará el nivel de constreñimiento de ésta, reduciendo el error mostrado por los participantes y la variabilidad del resultado de la acción.

H2.4: La aportación de recompensas en la tarea provocará una nueva modificación de la estructura de la variabilidad del resultado de la acción, mostrando una oscilación ensayo a ensayo aún más irregular y menos autocorrelacionada.

H3: La introducción de un constreñimiento que afecte sobre el rendimiento en una tarea motora cíclica, no afectará sobre las características del movimiento no relacionadas con los resultados de precisión.

H3.1: El tiempo de movimiento de la tarea cíclica de punteo no se verá afectado por el constreñimiento de la precisión, manteniendo la estructura de la oscilación ensayo a ensayo, tanto en irregularidad como en autocorrelación.

H3.2: La orientación de la mano en el momento de punteo no se verá afectada por el constreñimiento de la precisión, manteniendo la estructura de la oscilación en la posición de ensayo a ensayo, tanto en irregularidad como en autocorrelación.

H4: En los ensayos finales de una la tarea cíclica de punteo, los participantes mostrarán un mayor nivel de rendimiento y una oscilación ensayo a ensayo más irregular y menos autocorrelacionada, en comparación con los ensayos iniciales de la tarea.



3 MÉTODO

3.1 PARTICIPANTES.

Cuarenta y dos participantes (32 hombres y 10 mujeres) con una media de edad de 26 años ($SD = 5.02$) tomaron parte en el estudio de forma voluntaria, donde la totalidad de la muestra estuvo compuesta por alumnos de grado y postgrado de la universidad Miguel Hernández de Elche. Previa a la realización de los test fueron informados de las tareas a realizar durante la fase de registro, así como de los objetivos del mismo. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado de acuerdo con las directrices éticas de la Universidad Miguel Hernández.

3.2 TAREA EXPERIMENTAL.

La tarea experimental realizada en este estudio consistía en una tarea de punteo en la cual los participantes sujetaban un estilete (de forma similar a un bolígrafo) de forma vertical con la punta apoyada sobre una superficie plana situada sobre una mesa frente a ellos. A partir de esa posición, los participantes debían levantar el estilete y llevar la mano hacia un lateral para tocar con el dorso de la mano un soporte vertical acolchado situado a 20 cm a la derecha del punto de partida y 15 cm de altura. Tras tocar en el lateral, nuevamente dirigían el estilete a la zona de contacto inicial para impactar con la punta sobre la superficie. La tarea se repetía continuamente resultando un movimiento cíclico de punteo.

Los participantes debían adoptar una posición cómoda frente a la mesa, sin apoyar en ningún momento el antebrazo y realizando el movimiento cíclico con naturalidad, sin mayor exigencia de mantenimiento de ángulos o distancias, y tratando de mantener una distancia constante con respecto a la mesa durante todo el tiempo de ejecución.

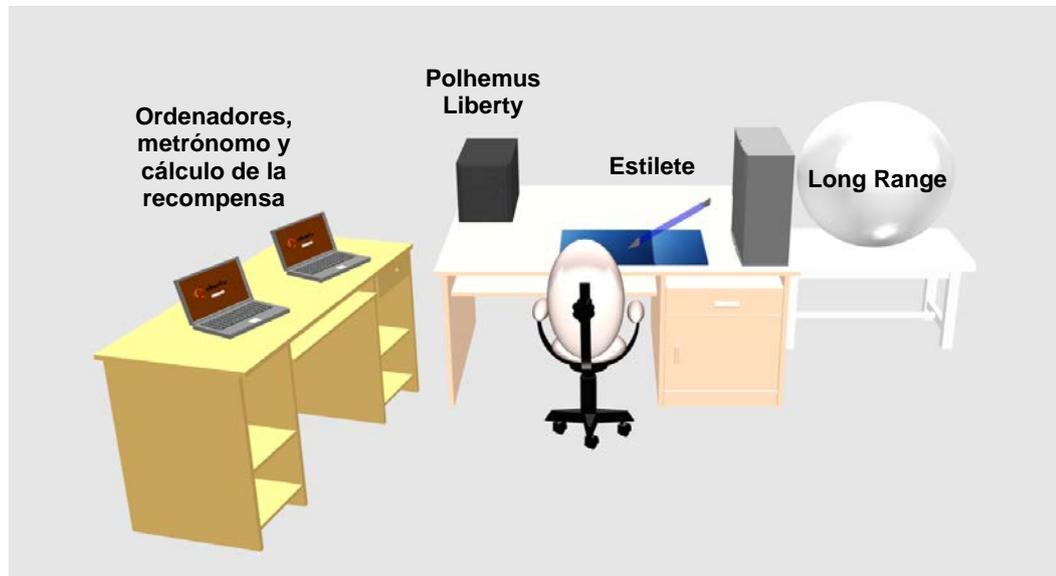


Figura 2. Situación experimental

Los participantes debían realizar 600 ciclos para completar el test. La frecuencia de ejecución estaba marcada durante todo el registro por un metrónomo, que ajustaba la frecuencia de punteo a 1Hz. La tarea empezaba con el primer sonido del metrónomo y finalizaba en el momento que dejaba de sonar, una vez finalizados la totalidad de los ensayos.

3.3 INSTRUMENTAL.

Para el registro de la precisión y la cinemática del movimiento de cada una de las tareas de punteo se utilizó un sensor de posición tridimensional Stylus del sistema Polhemus Liberty (Polhemus TM Vermont. EE. UU.). Este sistema tiene una precisión de 0.076 cm para la posición (ejes anterior-posterior, medial-lateral y vertical) y 0.15° para la orientación angular (azimut, elevación y rotación), con una frecuencia de registro de 240 Hz.

La frecuencia de ejecución de los movimientos de punteo fue controlada por un programa basado en LabView (National Instruments, Austin, TX), que actuaba como un metrónomo y a su vez permitía modificar las situaciones de registro, así como manipular la recompensa proporcionada en función de tres situaciones experimentales posibles (Figura 3).

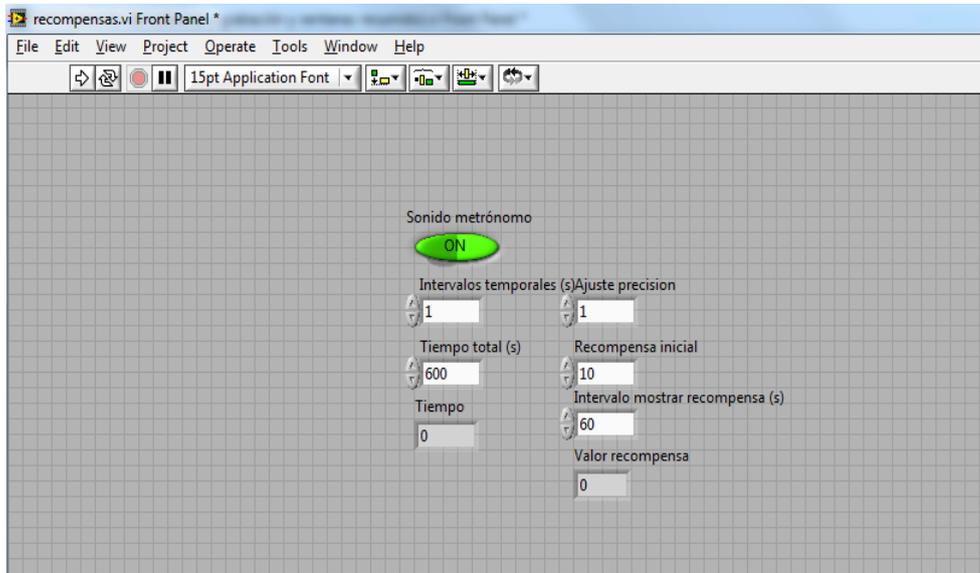


Figura 3. Software en entorno LabView creado para controlar la frecuencia de ejecución mediante la función de metrónomo, así como para calcular el tiempo de ejecución y la reducción de la recompensa en función del ajuste de precisión.

3.4 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN Y DISEÑO.

3.4.1 Variable independiente.

Para testar las hipótesis de este estudio, y cumplir con los objetivos de esta tesis, se consideró como variable independiente la magnitud de constreñimiento de la ejecución de la tarea con cinco niveles experimentales. Los niveles fueron diseñados tratando de ordenarlos de menor a mayor grado de constreñimiento sobre las exigencias de precisión espacial de la tarea de punteo. Los tres niveles se diferenciaron como nivel Bajo, Medio y Alto. Dentro del nivel alto se diferenciaron otros tres niveles (Alto 1, Alto 2 y Alto 3). Estos tres últimos niveles fueron tratados experimentalmente entre-grupos tal y como se define en el apartado de diseño experimental.

En todos los niveles propuestos, el tiempo de movimiento fue marcado externamente, manteniendo estable la frecuencia de ejecución. La orientación de la mano no fue condicionada, dejando que los participantes libremente adoptaran la posición más cómoda para ellos durante la ejecución de todas las tareas. Así, los niveles de la variable independiente fueron los siguientes.

3.4.1.1 *Nivel Bajo: Ejecución de la tarea de punteo sin indicación del punto de impacto (condición Sin Diana).*

Los participantes tenían que realizar la tarea cíclica de punteo sujetando el estilete de forma vertical y ajustando sus movimientos al ritmo marcado por un metrónomo. Se realizaba el punteo libre sobre la superficie plana situada en la mesa. Para obtener un desplazamiento homogéneo, los participantes debían superar una línea marcada en la superficie a una distancia de 15 cm a la izquierda de la zona vertical acolchada. Durante la ejecución de la tarea, los participantes no recibieron ningún tipo de información sobre las exigencias de precisión, ni sobre la precisión obtenida o el tiempo de ejecución.

3.4.1.2 *Nivel Medio: Ejecución de la tarea ajustada a una diana (situación Con Diana).*

Los participantes fueron requeridos para realizar la misma tarea, pero ciñéndose al lugar de impacto en el centro de una diana marcada sobre la superficie. Esta diana consistía en una cruz formada por dos líneas de 2 cm localizadas a 20 cm de la zona vertical acolchada y a 15 cm del borde de la mesa. Durante la ejecución de la tarea, los participantes no recibían ningún tipo de información sobre la precisión obtenida o el tiempo de ejecución.

3.4.1.3 *Nivel Alto: Ejecución de la tarea ajustada a una diana con aplicación de recompensa (situación Con Recompensa).*

Los participantes tenían que realizar la tarea marcada en la situación anterior, pero en esta ocasión además de marcar una diana, eran informados de que iniciaban la tarea con una cantidad de 10 euros, que se reduciría en función de la precisión obtenida. La evolución de la recompensa inicial fue manipulada para ser reducida cada minuto en función de un algoritmo matemático introducido en el software que marcaba el ritmo de movimiento. Dicho algoritmo matemático permitía definir tres niveles de reducción de la recompensa a lo largo del tiempo, provocando tres niveles de constreñimiento de la tarea con recompensa. Estos tres niveles se corresponden con la manipulación en base a la reducción de la cuantía en

tres posibles niveles (Alto 1, Alto 2, Alto 3) que representaban un descenso de los niveles de constreñimiento de la tarea de mayor a menor. Todos los niveles eran similares al inicio de la tarea, encontrándose dos bifurcaciones presentadas en el minuto tres y en el minuto seis. Los participantes recibían a intervalos de un minuto feedback sobre el tiempo discurrido en la tarea, así como de la cuantía de recompensa restante (Tabla 2). Tal y como se expresó anteriormente, y según se detallará en el apartado del diseño, los participantes fueron distribuidos en tres grupos a los que se les sometió cada uno de ellos a unos de los niveles de recompensa.



Tabla 2. Información ofrecida a los participantes cada minuto en función de la situación experimental realizada.

Tiempo de registro (min)	NIVEL DE RECOMPENSA (€)		
	Alto 1	Alto 2	Alto 3
1	10	10	10
2	9 ± 0.5	9 ± 0.5	9 ± 0.5
3	8.5 ± 0.5	8.5 ± 0.5	8 ± 0.5
4	8 ± 0.5	8 ± 0.5	7 ± 0.5
5	7 ± 0.5	7 ± 0.5	6 ± 0.5
6	6 ± 0.5	6 ± 0.5	5 ± 0.5
7	5.5 ± 0.5	5 ± 0.5	4 ± 0.5
8	5 ± 0.5	4 ± 0.5	3.5 ± 0.5
9	4.5 ± 0.5	3.5 ± 0.5	3 ± 0.5
10	4 ± 0.5	3 ± 0.5	2 ± 0.5

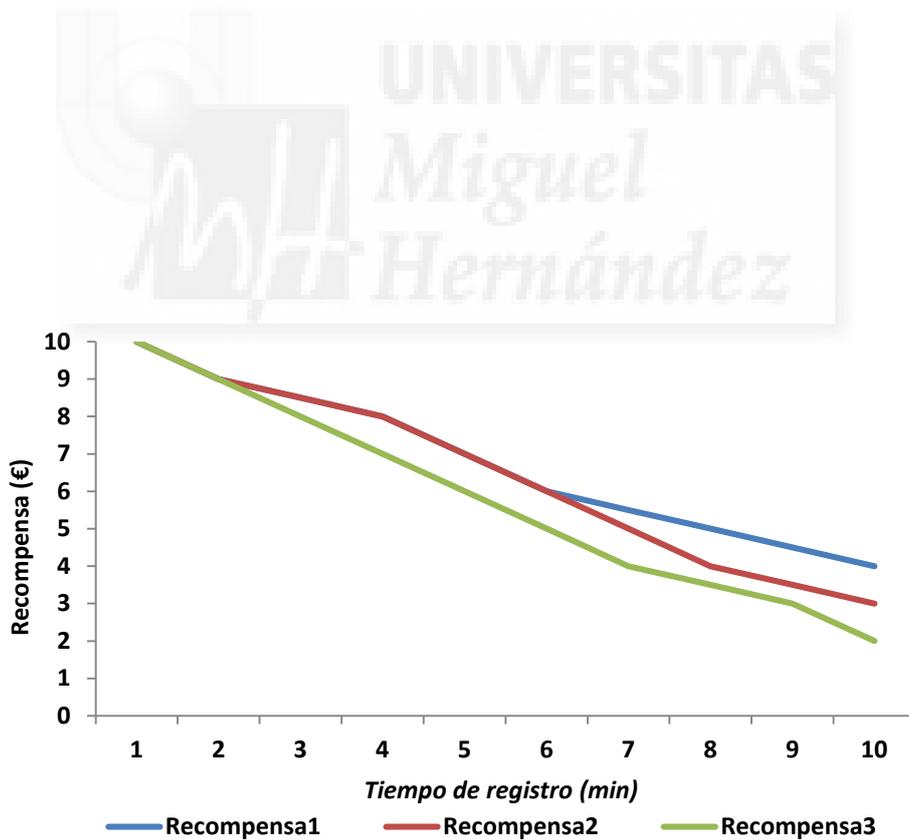


Figura 4. Representación gráfica de la evolución por minuto de la recompensa de cada grupo experimental.

3.4.2 Variables dependientes.

En esta tesis doctoral se han analizado varios grupos de variables dependientes. En uno de ellos se encuentran las variables utilizadas para evaluar la magnitud del error cometido en las tareas de punteo. Dado que la magnitud del error se calcula en relación a un valor de referencia, en la tarea sin diana se utilizó como referencia la posición de la punta del estilete al punto de inicio. En las tareas con diana, se utilizaron las variables de error obtenido en función del lugar de impacto de la punta del estilete respecto al punto criterio marcado por la diana.

Otro grupo de variables a medir es la variabilidad del error. En las tareas con y sin diana la variabilidad fue analizada mediante el promedio de la dispersión de las posiciones de la punta del estilete en el momento del impacto en la superficie de todos los ensayos.

Para el análisis de la estructura de la variabilidad se analizó un tercer grupo de variables que miden la regularidad y auto-correlación de las series temporales, tanto del error como del tiempo de movimiento; y de la orientación de la mano en cada acción de punteo, expresada en los ángulos azimut, elevación y rotación del estilete.

3.4.2.1 Variables utilizadas para evaluar la magnitud del error.

Para evaluar el error obtenido en el test sin diana se analizaron los resultados del error absoluto (EA) obtenidos en el eje medio lateral (ML) y anteroposterior (AP), así como el error radial medio (ERM)

En la tarea sin diana, para calcular el EA (Ecuación 1) se utilizó el promedio de las posiciones en los ejes ML y AP de los lugares de impacto de la punta del estilete sobre la superficie horizontal de cada una de las repeticiones respecto al punto inicial desde donde iniciaban la tarea. Además, se calculó el ERM (Ecuación 2), calculado como la raíz cuadrada de la suma de las distancias de la posición del estilete respecto al punto criterio (Hancock, Butler y Fischman, 1995; Prieto, Myklebust, Hoffmann, Lovett y Myklebust, 1996).

$$EA = \frac{\sum_{i=1}^n |Xi - C|}{N} \quad (1)$$

$$ERM_{(mm)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{((Xi - C)^2 + (Yi - C)^2)} \quad (2)$$

Para evaluar el error obtenido en los test con diana realizados por los participantes se calculó el EA en el eje ML y en el eje AP, obtenido como el promedio de la posición de la punta del estilete en cada una de las repeticiones en el momento del impacto de la punta sobre la superficie horizontal respecto al punto criterio marcado por la diana. Se calculó el ERM calculado como la raíz cuadrada de la suma de las distancias de la posición del estilete respecto al punto criterio (Hancock y col., 1995; Prieto y col., 1996).

3.4.2.2 Variables utilizadas para evaluar la variabilidad del error.

Para evaluar la variabilidad del error en los test sin diana realizados por los participantes se analizaron los resultados obtenidos en los ejes ML y AP, y el ERM.

En la situación sin diana se calculó la desviación típica del error absoluto de los 600 ensayos de los ejes ML y AP, así como la desviación típica de los valores de error radial (ER), calculado como la dispersión de los valores de la posición de la punta del estilete en cada una de las repeticiones en el momento del impacto de la punta sobre la superficie horizontal respecto al punto de inicio del test.

Para evaluar la variabilidad del error en los test con diana realizados por los participantes se calculó la desviación típica de los valores de error absoluto de los 600 ensayos de los ejes ML y AP; así como la desviación típica de los valores de ER, calculado como la dispersión de los valores de la posición de la punta del estilete en cada una de las

repeticiones en el momento del impacto de la punta sobre la superficie horizontal respecto al punto criterio marcado por la diana.

3.4.2.3 Variables utilizadas para evaluar la estructura de la variabilidad del resultado del movimiento.

3.4.2.3.1 Regularidad de las series temporales de error y el tiempo de movimiento (TM) en cada una de las tareas.

Para evaluar la regularidad de las series temporales de error se analizaron las series temporales del error en el eje ML, error en el eje AP, ER y TM. El análisis de la regularidad de las series temporales fue realizado mediante la utilización de la Entropía Difusa (en adelante *Fuzzy Entropy*, *FuzzyEn*). El cálculo de *FuzzyEn* fue analizado siguiendo la ecuación desarrollada por Chen y col. (2007) y es descrito a continuación:

Para una serie temporal de N datos $\{u(i) : 1 \leq i \leq N\}$, se forma la secuencia $\{X_i^m, i = 1, \dots, N - m + 1\}$ tal que:

$$X_i^m = \{u(i), u(i + 1), \dots, u(i + m - 1)\} - u0(i),$$

Donde X_i^m representa m consecutivos u valores, comenzando con el punto i y generalizada mediante la eliminación de una línea base.

$$u0(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} u(i + j)$$

Para cada vector X_i^m , se define la distancia d_{ij}^m entre X_i^m y X_j^m como la máxima diferencia absoluta del correspondiente componente escalar.

$$d_{ij}^m = d[X_i^m, X_j^m] = \max_{k \in (0, m - 1)} |(u(i + k) - u0(i)) - (u(j + k) - u0(j))|.$$

Dado "n" y "r", calcular el grado de similitud D_{ij}^m of X_j^m to X_i^m a través de una función *Fuzzy* $\mu(d_{ij}^m, n, r)$

$$D_{ij}^m(n, r) = \mu(d_{ij}^m, n, r)$$

Donde la función *Fuzzy* $\mu(d_{ij}^m, n, r)$ es la función exponencial

$$\mu(d_{ij}^m, n, r) = \exp(-(d_{ij}^m) n/r)$$

Se define la función \emptyset^m como

$$\emptyset^m(n, r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \left(\frac{1}{N-m-1} \right) \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m} D_{ij}^m$$

Del mismo modo, se forma $\{X_i^{m+1}\}$ y se aplica la función \emptyset^{m+1} tal que:

$$\emptyset^{m+1}(n, r) = \frac{1}{N-m} \times \sum_{i=1}^{N-m} \left(\frac{1}{N-m-1} \right) \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m} D_{ij}^{m+1}$$

Finalmente, se puede definir el parámetro *FuzzyEn* (m, n, r) de las secuencias como el logaritmo natural negativo de la desviación de \emptyset^m from \emptyset^{m+1}

$$= \lim_{N \rightarrow \infty} [\ln \emptyset^m(n, r) - \ln \emptyset^{m+1}(n, r)]$$

El cual, para conjuntos de datos finitos, pueden ser estimados por el estadístico

$$\text{Fuzzy En } (m, n, r, N) = \ln \emptyset^m(n, r) - \ln \emptyset^{m+1}(n, r)$$

Hay tres parámetros que deben ser fijados para cada cálculo de *FuzzyEn*. El primer parámetro “ m ”, al igual que cuando es utilizado *ApEn* y *SampEn*, es la longitud de las secuencias o vectores a comparar. Los otros dos parámetros “ r ” y “ n ” determinan el ancho o ventana de tolerancia y el gradiente del límite de la función exponencial respectivamente.

Un gran valor de “ m ” es desfavorable debido a la necesidad de un gran valor de N ($10^m - 30^m$), el cual es complicado de cumplir en un conjunto de datos fisiológicos, o la necesidad de un límite muy ancho, que dará lugar a la pérdida de información. En cuanto a

la similitud del límite determinado por los otros dos parámetros “ r ” y “ n ”, un límite demasiado amplio podría suponer también una pérdida información. Experimentalmente, es conveniente establecer la anchura del límite como “ r ” multiplicado por la desviación típica del conjunto de datos original y elegir números enteros pequeños para la selección “ n ”. En nuestro estudio, de acuerdo con Chen y col. (2007) se utilizaron los valores $m = 2$, $n = 2$ y $r = 0.2 \cdot SD$ para el análisis del *FuzzyEn*.

3.4.2.3.2 Auto-correlación de las series temporales del error y el tiempo de movimiento en cada una de las tareas.

Para analizar la auto-correlación de las series temporales de error se analizaron las series temporales del error en el eje ML, error en el eje AP, ER y TM. El análisis de las series temporales fue realizado a través de *DFA* mediante el procedimiento que es detallado a continuación (Peng, Havlin, Stanley y Goldberger, 1995).

Para calcular el índice α , *DFA* incluye una serie de operaciones: Primero, la serie $X(t)$ analizada es integrada, para calcular para cada “ t ” la salida acumulada de la media de toda la serie:

$$X(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \bar{x}]$$

En Segundo lugar, las series $X(k)$ integradas son divididas en intervalos no solapados de longitud “ n ”. En cada intervalo, los datos son obtenidos mediante un ajuste de regresión lineal (que representa la tendencia local dentro del intervalo) que es ajustada a los datos. A cada serie $X(k)$ se le elimina la tendencia restando los valores teóricos $X_n(k)$ dados por la regresión. Finalmente, para cada longitud de intervalo “ n ”, el tamaño de la fluctuación para esta serie integrada y sin tendencia es dado por:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [X(k) - X_n(k)]^2}$$

Este cálculo es repetido en diferentes longitudes de segmento para producir el índice $F(n)$ como una función del tamaño del segmento “ n ”. Típicamente $F(n)$ incrementa con la longitud del segmento. Finalmente, se realiza una relación lineal sobre un gráfico logarítmico doble que indica un grado de correlación caracterizado por un exponente α que es la pendiente de la recta de regresión en relación logarítmica $F(n)$ a $\log n$.

La pendiente α fue obtenida mediante un tamaño de ventanas de $4 \leq n \leq N/10$ para maximizar las correlaciones de largo alcance y reducir el error incurrido por la estimación de α (Chen, Ivanov, Hu y Stanley, 2002).

- Valores de $\alpha < 0.5$ implica anti-persistencia (ej. La trayectoria tiende a volver desde donde partió).
- Valores de $\alpha = 0.5$ implican una señal no correlacionada, relacionada con la distribución denominada ruido blanco
- Valores de $\alpha > 0.5$ implican persistencia (ej. La trayectoria tiende a continuar en su dirección actual).
- Valores de $\alpha = 1$ implican una señal correlacionada y relacionada con la distribución denominada ruido rosa.
- Valores de $\alpha > 1$ implica una señal no estacionaria.

3.4.2.4 *Variables utilizadas para analizar la estructura de la variabilidad de la ejecución del movimiento.*

3.4.2.4.1 *Regularidad de la orientación de la mano en el momento del punteo en cada una de las tareas.*

Para analizar la regularidad de las series temporales de la orientación de la mano en el momento del punteo se analizó la entropía de las series de valores de los ángulos azimut, elevación y rotación en el momento de punteo en cada una de los ciclos. Se utilizó *FuzzyEn* mediante la ecuación detallada anteriormente (Chen y col., 2007).

3.4.2.4.2 *Auto-correlación de la orientación de la mano en el momento del punteo en cada uno de los test.*

Para analizar la auto-correlación de las series temporales de la orientación de la mano en el momento del punteo se analizaron las series de valores de los ángulos azimut, elevación y rotación en el momento de punteo en cada una de los ciclos. Se utilizó DFA mediante la ecuación presentada anteriormente (Peng, Havlin, Stanley y Goldberger, 1995).

3.4.3 *Variables contaminantes*

Para reducir el efecto de aquellas posibles variables contaminantes que pudieran afectar durante la toma de datos, se controlaron algunas de las condiciones de medida durante el experimento.

3.4.3.1 *Instrumental de registro.*

Previo al comienzo de la toma de datos se realizaron pruebas para garantizar el correcto funcionamiento del instrumental utilizado en el proceso de registro. El instrumental utilizado en el transcurso de la toma de datos fue el mismo para toda la investigación, con el objetivo de evitar los posibles efectos contaminantes y su influencia en los resultados en las variables dependientes.

3.4.3.2 *Posición del participante durante el proceso de toma de datos.*

Durante la investigación se trató de que todos los participantes realizaran las tareas siguiendo el mismo criterio y evitando así que su posición de partida tuviera influencia sobre los resultados de las variables dependientes. Para ello, se comunicó a los participantes de que mantuvieran una posición cómoda y relajada durante la toma de datos, dando la instrucción para que se situaran sentados frente a la mesa con el brazo ejecutante alineado a la zona central de la diana o contacto inicial y sujetando el estilete de forma vertical durante todo el proceso de registro, siendo esa la posición que deberían mantener durante la realización de todas las tareas.

3.4.3.3 *Efectos de los campos electromagnéticos.*

Dado que el instrumental utilizado es un sistema electromagnético, muy sensible a la presencia de metal y a campos electromagnéticos que pudieran estar próximos, se utilizó durante las tomas de datos una mesa de madera, así como polietileno y esponja para la superficie acolchada donde debían tocar con el dorso de la mano. La superficie donde se realizaban los impactos con la punta del estilete era de goma para mantener aislado el instrumental de registro de cualquier campo magnético que pudiera afectar. A los participantes se les informaba de que debían dejar cualquier elemento de metal que pudieran llevar encima, así como de apagar el teléfono móvil durante el proceso de registro. El receptor del sistema electromagnético se situó sobre un banco de plástico para evitar la afectación de los campos electromagnéticos provenientes del suelo del laboratorio.

3.4.3.4 *Situación de registro.*

Para mantener estable la situación de registro, se mantuvo durante todo el proceso de toma de datos la ubicación del instrumental, colocado en el centro del laboratorio. Se utilizó una silla ergonómica regulable que permitía adaptar la altura de la silla en función de la estatura del participante. A los participantes se les pedía que mantuvieran una posición cómoda durante la toma de datos y que mantuvieran esta posición durante la sesión.

3.4.3.5 *Condiciones ambientales.*

La tarea fue llevada a cabo en el laboratorio de Aprendizaje y Control Motor del Centro de Investigación del Deporte (CID), donde se disponía de un sistema de climatización que mantenía una temperatura de 25°C durante la toma de datos. La iluminación que disponía el laboratorio evitaba sombras que pudieran impedir la correcta ejecución de la tarea. Se restringió el acceso al laboratorio durante el proceso de toma de datos, para evitar posibles distracciones sobre los participantes.

3.4.3.6 *Tiempo de movimiento.*

Debido a la existencia de evidencias científicas que recogen que el tiempo de movimiento puede ser una variable que podría afectar a la estructura de la variabilidad del movimiento, se planteó que el tiempo de movimiento fuera controlado durante todo el proceso de registro mediante la utilización de un metrónomo, manteniendo la misma frecuencia en todos los test realizados por los participantes.

3.4.4 *Diseño.*

En el desarrollo de esta Tesis Doctoral, y para cumplir los objetivos propuestos, se aplicó un diseño mixto de medidas repetidas para comparar los efectos de tres niveles de la variable independiente y de medidas independientes aplicando los tres niveles más altos de la variable independiente entre los grupos (Maxwell y Delaney, 1990, 2004).

En la aplicación de la variable “constreñimiento de la tarea”, todos los participantes pasaron por tres de las dimensiones de dicha variable independiente que se corresponden con los niveles de constreñimiento Bajo (situación Sin Diana), Medio (situación Con Diana) y Alto (situación Con Recompensa). Este diseño experimental tiene ciertas ventajas, que residen principalmente en el menor costo del número de participantes, ya que todos los participantes reciben todos los tratamientos, actuando cada uno de ellos como su propio grupo control (Llobell, Navarro y Pérez, 1996).

Para evitar los efectos provocados por el orden de aplicación de cada uno de los niveles de la variable independiente, se utilizó la técnica de contrabalanceo inter-sujeto (Underwood y Shaughnessy, 1975), asignando aleatoriamente a cada participante el orden de realización de los mismos, siguiendo la asignación en el orden: ABC, BAC, ACB, CAB, CBA y BCA.

Para testear el efecto provocado por los niveles de constreñimiento planteados en las tareas con recompensa, los tres niveles propuestos (Alto 1, Alto 2 y Alto 3) se manipularon

entre-sujetos, donde los participantes fueron distribuidos de forma aleatoria en tres grupos e informados previamente de las condiciones de la tarea.

Las posibles relaciones entre las variables de este estudio fueron analizadas mediante la realización de un diseño correlacional con la intención de conocer la intensidad y el sentido de estas relaciones.

3.5 PROCEDIMIENTO.

3.5.1 Estudio piloto.

La revisión de la literatura científica referente a la utilización de herramientas de análisis no lineal recoge en algunos de sus trabajos la utilización de series temporales de al menos 1024 datos para realizar este tipo de análisis, argumentando que series temporales más cortas pueden ser menos fiables (Holden, 2005). Con el fin de ajustar el tiempo de registro y evitar los posibles efectos de fatiga o descenso de la motivación al realizar una tarea cíclica con diferentes condicionantes, se realizó un estudio piloto para determinar el protocolo y la metodología a desarrollar durante la posterior toma de datos. En el estudio tomaron parte 4 participantes que desarrollaron 2 tareas de punteo: a) ejecución de la tarea de punteo sin constreñir (condición Sin Diana); y b) ejecución de la tarea ajustada a un constreñimiento (situación Con Diana), con un total de 1200 ensayos cada una de ellas (Holden, 2005). La ejecución estuvo marcada por un metrónomo a una frecuencia de 1Hz durante cada una de las tareas. Los participantes realizaban ambas tareas en una misma sesión, con 5 minutos de descanso entre ambas. Finalizada la fase de toma de datos se calcularon los promedios del EA de los ejes ML y AP y se calculó el ERM para toda la serie. Posteriormente, se realizó un análisis de auto-correlación de las series temporales de error en los ejes ML, AP, el ER y el TM mediante el análisis de DFA. Los resultados obtenidos fueron inspeccionados visualmente para evaluar la estabilidad de los resultados, así como el tamaño de las series temporales a partir de las cuales se observan las primeras diferencias aparentes y se calculó las diferencias en función de la

duración de las series temporales. Finalizado el análisis y comprobada la estabilidad de los resultados, se decidió reducir el número de ensayos a 600 para optimizar los tiempos de registro.

3.5.2 Situación experimental.

Finalizado el estudio piloto y determinado el protocolo a seguir, se procedió a realizar el estudio principal, donde los participantes llevaron a cabo los test de punteo en el que debían realizar 600 ciclos continuos, manteniendo un ajuste temporal a una frecuencia de 1Hz marcada por un metrónomo. La prueba estaba compuesta por tres tareas que los participantes debían realizar en la misma sesión con un tiempo de descanso de 5 minutos entre las tareas. El test estaba compuesto por tres tareas que atendían a las tres dimensiones de la variable independiente: condición sin diana, situación con diana y situación con diana y con recompensa. Todas las tareas se iniciaban desde la alfombrilla situada sobre la mesa, realizando un desplazamiento lateral para tocar con el dorso de la mano una almohadilla situada perpendicular a la zona de registro y posteriormente volver a la zona de partida.



Figura 5. Participante realizando la tarea de punteo con diana durante una situación experimental.

En la condición sin diana, el participante iniciaba la tarea en un punto indeterminado sobre la superficie de goma situada sobre la mesa, manteniendo el ritmo marcado por el

Método

metrónomo, ajustando libremente el lugar de impacto con la punta del estilete. La única premisa era superar una línea lateral que marcaba el desplazamiento mínimo necesario para homogeneizar la realización la tarea.

En la condición con diana, los participantes debían de ajustarse en cada uno de los ensayos intentando impactar con la punta del estilete sobre la diana. El procedimiento de ejecución se mantenía igual que en la tarea sin diana descrito anteriormente.

En las tareas sin diana y con diana no se proporcionaba feedback de resultado ni tiempo de ejecución al participante, y únicamente recibían información de su propia ejecución.



Figura 6. Participante realizando la tarea de punteo sin diana durante una situación experimental.

En la situación con recompensa, la tarea se realizaba con una diana a la que los participantes debían de ajustarse en cada ensayo. Los participantes eran informados de que partían con una recompensa de 10 euros que se verían reducidos en función de la precisión obtenida en cada ensayo respecto a la diana. Para manipular las cantidades de recompensa ofrecida se utilizó un programa informático basado en *LabView* que reducía las cantidades de recompensa en función de tres posibles ajustes de precisión. Los participantes recibían feedback cada minuto del tiempo transcurrido en la prueba, así como feedback de la cantidad de recompensa restante.

Los participantes se encontraban cómodamente sentados en una silla ergonómica ajustable, con posibilidad de adaptarse a la altura de cada uno de los sujetos, situados frente a la mesa alineados respecto al hombro del brazo ejecutor con la zona central de registro. Durante toda la tarea se requería mantener una flexión aproximada de 90° en el codo, sin posibilidad de apoyar el brazo sobre la mesa o silla. Para todas las situaciones los participantes debían realizar un movimiento lateral para tocar una superficie de goma espuma localizada a 20 cm a la derecha que marcaba el desplazamiento mínimo en cada movimiento de punteo.

Durante la situación sin diana los participantes debían realizar la tarea de punteo libre sobre una alfombrilla de 50 x 50 cm situada sobre la mesa, con el único criterio de mantener el ajuste temporal marcado por el metrónomo. La alfombrilla estaba situada a una distancia de 20 cm con el objetivo de mantener el criterio mínimo de desplazamiento independientemente del lugar de punteo seleccionado por el participante.

En la tarea con diana, los participantes realizaban la tarea de punteo ajustándose a un parámetro espacial marcado por una cruz situada en el centro de la mesa a 15 cm frente al participante al que los participantes debían ceñirse como criterio de precisión.

En la tarea con recompensa se mantenía el mismo criterio de precisión utilizado en la situación con diana, incorporando la recompensa económica de inicio. En esta situación, el feedback de resultado y tiempo de ejecución era presentado cada minuto. Este feedback de resultado era manipulado por un programa informático que modificaba las cuantías de recompensa cada minuto en función de los criterios de precisión establecidos por el investigador y que son explicados en la sección de variables de investigación.

Todas las tareas se iniciaban con el primer pitido del metrónomo y finalizaba en el momento en que se completaban los 600 ensayos.

3.6 ANÁLISIS DE DATOS.

3.6.1 Preparación de las series temporales de datos.

La posición de la punta del estilete fue registrada durante todo el recorrido realizado en cada una de las repeticiones por el sistema de seguimiento de la posición Polhemus Liberty, que posteriormente fue exportada a archivos de texto. A continuación, se utilizó una aplicación creada “ad hoc” con el software de programación LabView 10 (National Instruments, Austin, TX, USA) para extraer las series de datos para cada ejecución y tarea (figura 7). Las series temporales de posición del estilete en cada ciclo fueron obtenidas de la posición de la punta del estilete en el momento del impacto de la punta sobre la superficie horizontal, calculadas en base al valle en el eje vertical (Z), que era considerado el momento de impacto en la superficie. Los datos extraídos correspondían a las coordenadas de los ejes ML (X) y AP (Y), así como el tiempo de movimiento de ejecución de cada ciclo. Estos datos fueron exportados en series temporales en archivos de tipo texto para su análisis posterior.

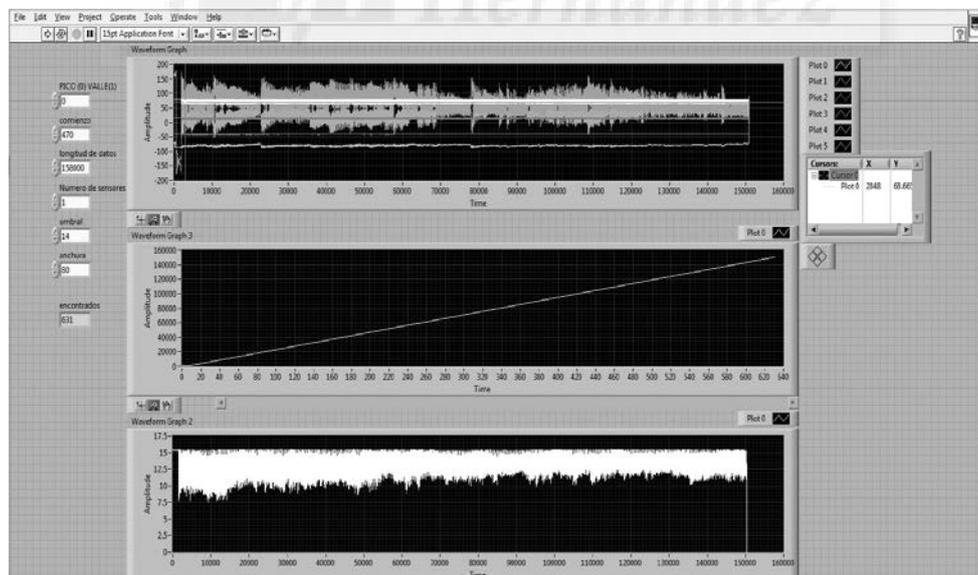


Figura 7. Software en entorno LabView creado para calcular las series temporales en base a la posición de la punta del estilete en cada una de las repeticiones en el momento del impacto de la punta sobre la superficie horizontal calculadas en base al pico máximo.

3.6.2 Cálculo de las variables dependientes de la ejecución y los resultados del movimiento.

Los archivos extraídos mediante el procedimiento anterior eran exportados a Excel donde se calculaba en función del punto de inicio el error obtenido en los ejes ML y AP, el error absoluto de los ejes ML y AP, y el ER.

El rendimiento en cada una de las tareas fue analizado calculando los promedios de las series temporales para cada variable de error en cada situación de registro.

Se calcularon los promedios y las desviaciones típicas de los valores absolutos en los ejes ML y AP, así como el ERM calculado mediante el promedio de los valores obtenidos al calcular el ER de cada ensayo, mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los ejes ML y AP (Ecuación 2). El tiempo de movimiento para cada ensayo fue calculado restando la duración en el momento del ensayo con el ensayo anterior. Los cálculos fueron realizados para cada participante y tarea realizada.

Las series temporales de cada una de las variables de error en los ejes ML, AP, así como del ER para cada una de las situaciones, fueron creadas utilizando cada uno de los datos extraídos para cada ensayo.

Los ángulos fueron calculados manteniendo el mismo criterio que las variables de error. Para corregir los cambios de hemisferio y obtener las series temporales, los ángulos fueron obtenidos a partir del cálculo del seno para el ángulo azimut y el cálculo del coseno para los ángulos elevación y rotación.

3.6.3 Cálculo del rendimiento en las fases inicial, intermedia y final de las series temporales de error.

Para evaluar la evolución temporal del rendimiento, se calcularon sobre las series temporales de los ejes ML y AP, así como en el ER los promedios del error en la fase inicial

Método

que comprendía el promedio de error del ciclo de ensayos 1 al 200, fase media que correspondía el promedio del error del ciclo de ensayos 201 al 400 y parte final que comprendía el promedio de error del ciclo de ensayos 401 al 600.

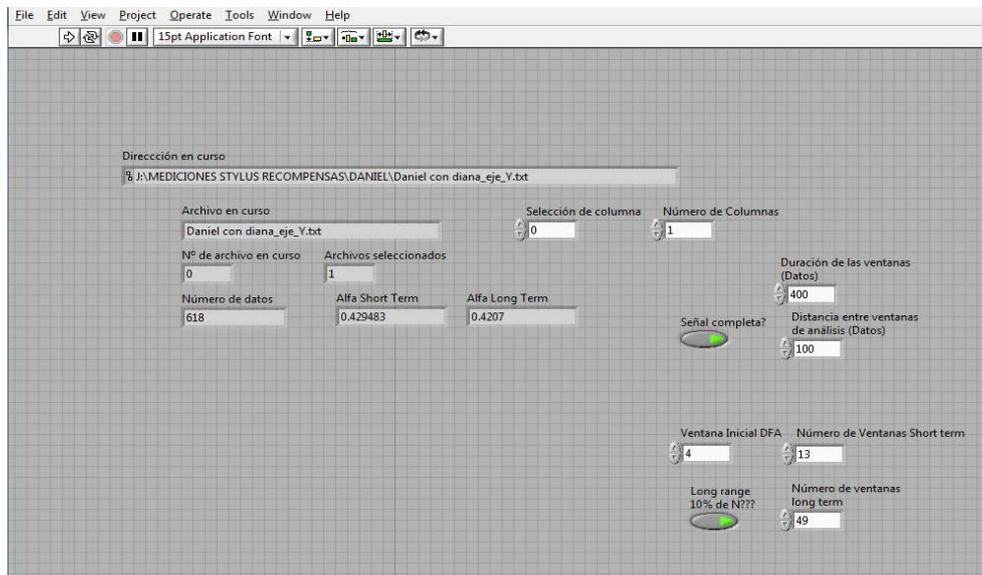


Figura 8. Software en entorno LabView creado para calcular los promedios de las variables de error por ventanas inicial, intermedia y final.

3.6.4 Análisis de la auto-correlación de las series temporales de error y tiempo de movimiento.

Para evaluar la presencia de auto-correlación, las series temporales creadas a partir de los errores en los ejes ML y AP, como las series temporales del ER y el TM fueron analizadas mediante la herramienta DFA. Utilizando el mismo procedimiento, se analizaron las series temporales de la orientación de la mano en el momento del punteo en cada de las tareas para evaluar la presencia de auto-correlación en las orientaciones angulares azimut, elevación y rotación.

Para ver la evolución de la presencia de auto-correlación de las series temporales durante cada tarea, se realizó el análisis DFA por ventanas solapadas cada 300 puntos con 10 puntos de distancia entre ventanas, obteniéndose un total de 30 ventanas. Se calcularon los promedios de los valores de autocorrelación cada 10 ventanas, obteniendo finalmente los resultados de auto-correlación de las partes inicial, que recogía el promedio de los resultados de las ventanas 1 a 10, parte media que correspondía al promedio de los resultados de las ventanas 11 a 20 y parte final que abarcaba el promedio de los resultados de las ventanas 21 a 30.

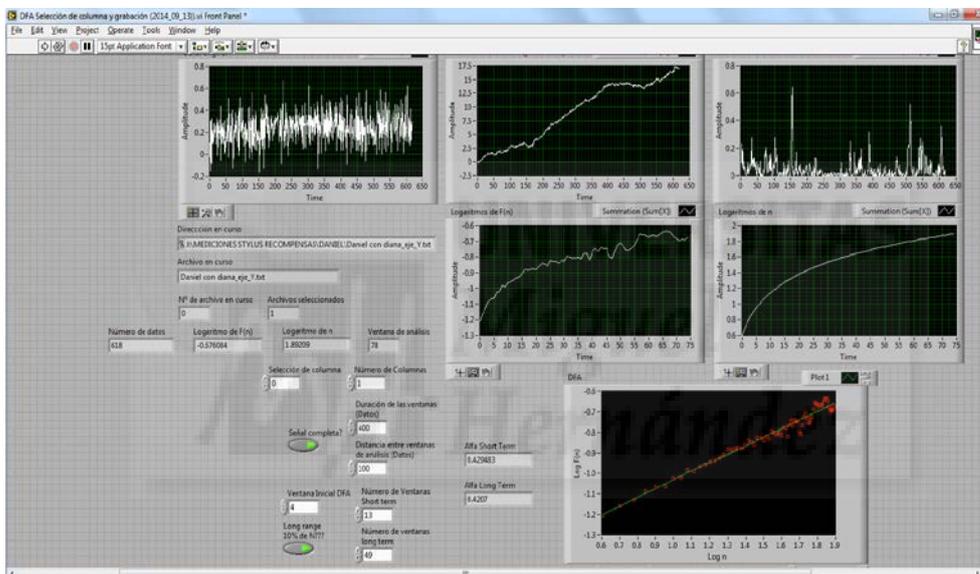


Figura 9. Software en base LabView para el cálculo de la auto-correlación de las series temporales.

3.6.5 Análisis de la regularidad de las series temporales de error y tiempo de movimiento.

La regularidad de las series temporales de error en los ejes ML y AP, así como de las series temporales del ER y el TM fue calculada utilizando las herramientas *ApEn*, *SampEn* y *FuzzyEn*, utilizando una longitud de los vectores de $m = 2$, con una ventana de tolerancia en proporción a la desviación típica de $r = 0.2 * SD$ y un gradiente infinito de $n = 2$ (Pincus y Goldberger, 1994). El análisis de la regularidad de las series temporales se realizó utilizando un programa diseñado al efecto por el grupo de investigación. De los resultados obtenidos de los análisis de regularidad realizados para esta tesis doctoral, únicamente se utilizaron los resultados de *FuzzyEn* por su menor dependencia sobre el tamaño de las

series temporales y su mayor robustez al ruido, así como su demostrada consistencia relativa y su buena fiabilidad (Caballero, Sabido, Barbado y Muelas, 2012; Caballero y col., 2014; Caballero y col., 2015). Los resultados de *ApEn* y *SampEn* realizados en el análisis son presentados como anexos 4 y 5 en esta tesis.

3.6.6 Análisis estadístico.

Se realizó la prueba *Shapiro-Wilks* para constatar la normalidad de los datos, constatando que más del 85% de las variables mostraban una distribución normal. Esta prueba ha sido considerada especialmente por sus buenos resultados en todo tipo de distribuciones y por el número de la muestra utilizada en nuestro estudio, recomendando su utilización cuando el tamaño de la muestra es inferior a 50 (Razali y Wah, 2011).

Se realizó una ANOVA de medidas repetidas para analizar los efectos de la magnitud de los constreñimientos de ejecución de la tarea sobre las variables dependientes. Las comparaciones de las variables analizadas entre las magnitudes de los constreñimientos fueron realizadas mediante la corrección de Bonferroni.

El análisis de los efectos provocados sobre las variables de rendimiento y la estructura de la variabilidad del movimiento de los niveles Alto 1, Alto 2 y Alto 3, fue realizado mediante la realización de un ANOVA de un factor entre-sujetos para comparar las medias de los grupos. La existencia de diferencias entre las medias y las comparaciones múltiples fue realizada mediante una prueba de rango post hoc de Bonferroni.

El tamaño del efecto fue calculado en base al eta cuadrado parcial (η_p^2) para identificar la proporción de la varianza global que es atribuible al factor. Los valores de tamaño del efecto mayor o igual a 0.64 fueron considerados fuertes, alrededor de 0,25 fueron considerados moderados y menor o igual a 0,04 fueron considerados pequeños (Ferguson, 2009).

Las relaciones entre las variables dependientes utilizadas en este estudio se obtuvieron calculando el coeficiente de correlación de Pearson. Los niveles de correlación fueron clasificados siguiendo el criterio detallado a continuación: Excelente (0.90 – 1.00), alto (0.75 – 0.89), moderado (0.50 – 0.74) leve (0.25 – 0.49) y sin correlación (< 0.25) (Dawson y Trapp, 2004).

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico IBM SPSS versión 22 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). La hipótesis nula fue rechazada al nivel de significación del 95 % ($p < .05$).



4 RESULTADOS.

4.1 ESTUDIO PILOTO.

4.1.1 Comparación de la regularidad obtenida por los participantes en el estudio piloto en la tarea Sin Diana, en los ejes ML y AP en función del tamaño de las series temporales de datos.

En figura 10 se muestran los resultados de regularidad de las series temporales en el eje ML en la tarea sin diana, analizados en función de diferentes tamaños de las series temporales. El análisis comenzó con series temporales de 300 datos y fueron incrementadas con 100 datos hasta alcanzar los 1200 que formaron la totalidad de la tarea. Los resultados mostraron valores de regularidad estables a partir de series temporales de 600 datos manteniéndose esa estabilidad a medida que se incrementaba el tamaño de las mismas. En series temporales por debajo de 600 datos, los resultados se mostraron más inestables, observándose pequeñas fluctuaciones que se hacían más evidentes a medida que se disminuía el tamaño de las series temporales.

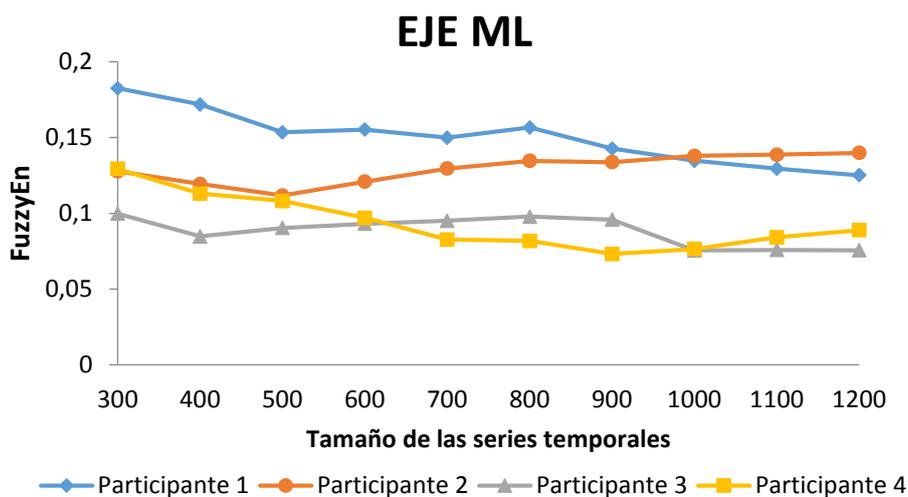


Figura 10. Resultados de la regularidad de las series temporales de datos en el eje ML en la tarea sin diana.

En la figura 11 se muestran los resultados de regularidad en el eje AP obtenidos en la tarea sin diana. Al igual que en el eje ML se analizaron diferentes tamaños de las series

temporales, observándose una tendencia más estable de los resultados obtenidos en series temporales de al menos 600 datos. Al igual que en el eje ML, las series temporales por debajo de 600 datos mostraron una menor estabilidad, oscilando sus valores a medida que las series temporales eran reducidas.

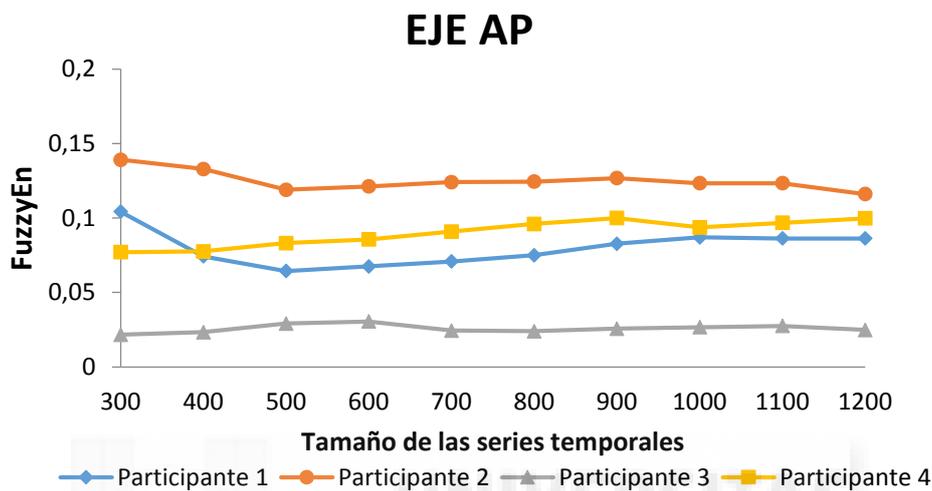


Figura 11. Resultados de la regularidad de las series temporales de datos en el eje AP en la tarea Sin Diana.

4.1.2 Comparación de la regularidad obtenida por los participantes en el estudio piloto en la tarea Con Diana, en los ejes ML y AP en función del tamaño de las series temporales de datos.

En la figura 12 se muestran los resultados del análisis de la regularidad de las series temporales en el eje ML en la tarea con diana. Al igual que en la tarea sin diana, los valores de regularidad se mostraron más estables con tamaños de las series temporales por encima de 600 datos, observándose la misma tendencia en todos los participantes. Como ya ocurriera en la tarea sin diana, series temporales por debajo de 600 datos mostraron una tendencia menos estable, observándose variaciones en los resultados a medida que se reducían los tamaños de las series temporales.

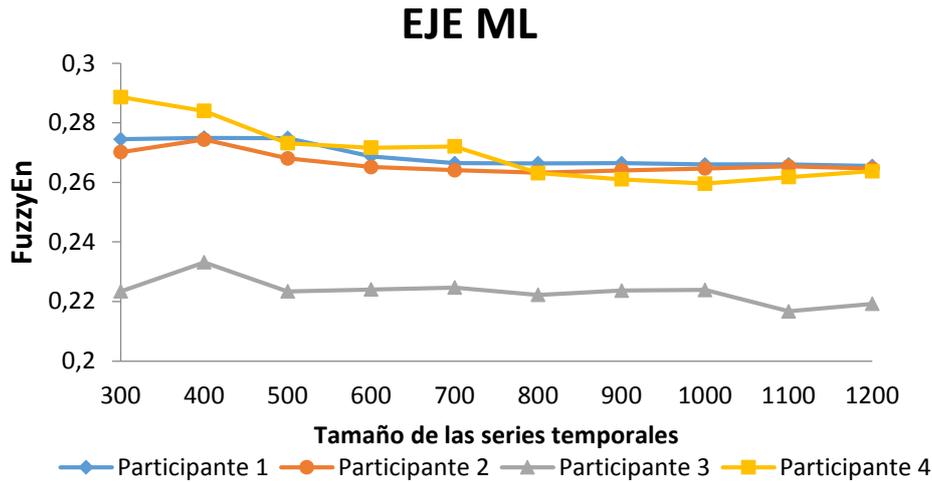


Figura 12. Resultados de la regularidad de las series temporales de datos en el eje ML en la tarea Con Diana.

Igualmente, en el eje AP de la tarea con diana (figura 13) los resultados obtenidos son similares a los presentados anteriormente para las tareas con y sin diana en ambos ejes, observándose mayor regularidad de los resultados con series temporales a partir de 600 datos y manteniéndose estables cuando los tamaños de las series temporales se incrementaban. Por el contrario, series temporales menores de 600 datos comienzan a mostrarse menos estables, observándose modificaciones en la tendencia de los resultados en prácticamente todos los participantes.

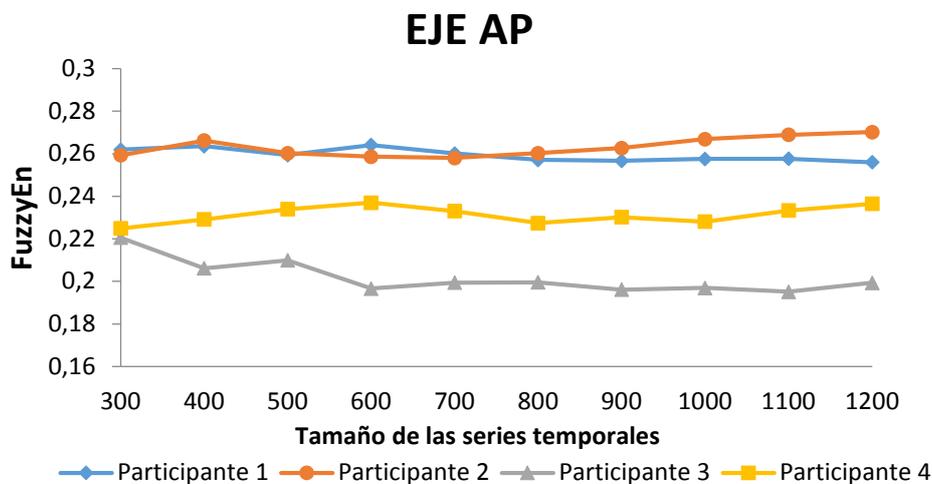


Figura 13. Resultados de la regularidad de las series temporales de datos en el eje AP en la tarea Con Diana.

4.1.3 Comparación de la autocorrelación obtenida por los participantes en el estudio piloto en la tarea Sin Diana, en los ejes ML y AP en función del tamaño de las series temporales de datos.

En la figura 14 se muestran los resultados de autocorrelación de las series temporales de error en el eje ML en la tarea sin diana. Los resultados mostraron una tendencia similar en los valores de autocorrelación en series temporales. Los resultados mostrados en series temporales de 600 datos fueron similares a los obtenidos en series temporales más grandes (1000-1200), manteniendo valores de autocorrelación próximos a 1 en ambas situaciones. La reducción del tamaño de las series temporales por debajo de 600 datos mostró una mayor inestabilidad en los resultados en todos los participantes.

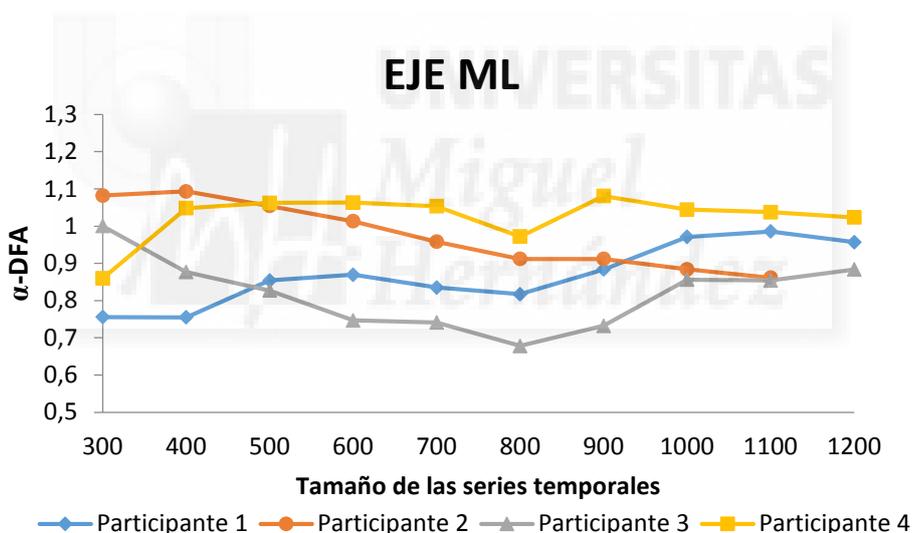


Figura 14. Resultados de autocorrelación de las series temporales de datos en el eje ML en la tarea Sin Diana.

En la figura 15 se muestran los resultados de autocorrelación de las series temporales de error en el eje anteroposterior en la tarea sin diana. Al igual que en el eje ML, los resultados de autocorrelación se mostraron similares en series temporales a partir de 600 datos hasta los 1200 que componían la totalidad del test. Con series temporales por debajo de 600 datos los resultados se mostraron menos estables, observándose pequeñas fluctuaciones y cambios en la tendencia de los datos. Asimismo, los resultados para todos los participantes oscilaron en valores cercanos a 1, al igual que sucediera en el eje ML.

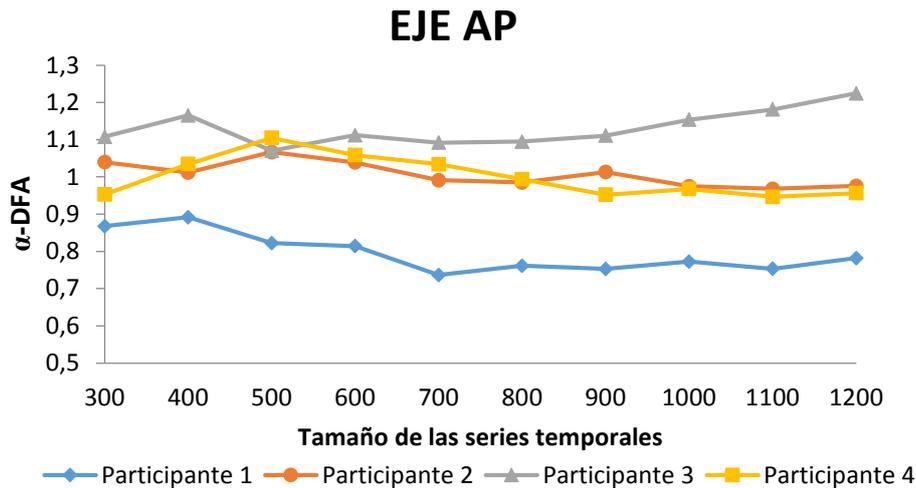


Figura 15. Resultados de autocorrelación de las series temporales de datos en el eje AP en la tarea Sin Diana.

La figura 16 muestra los resultados de autocorrelación de las series temporales de error en el eje ML en la tarea con diana. Los resultados mostraron una menor autocorrelación de las series temporales en comparación con la tarea sin diana en el mismo eje. Igualmente, los resultados mostraron una tendencia similar a la observada en la tarea sin diana, donde los valores de autocorrelación se mantenían estables con series temporales por encima de 600 datos, mostrándose los primeros cambios de tendencia a partir de series temporales inferiores a 600 datos.

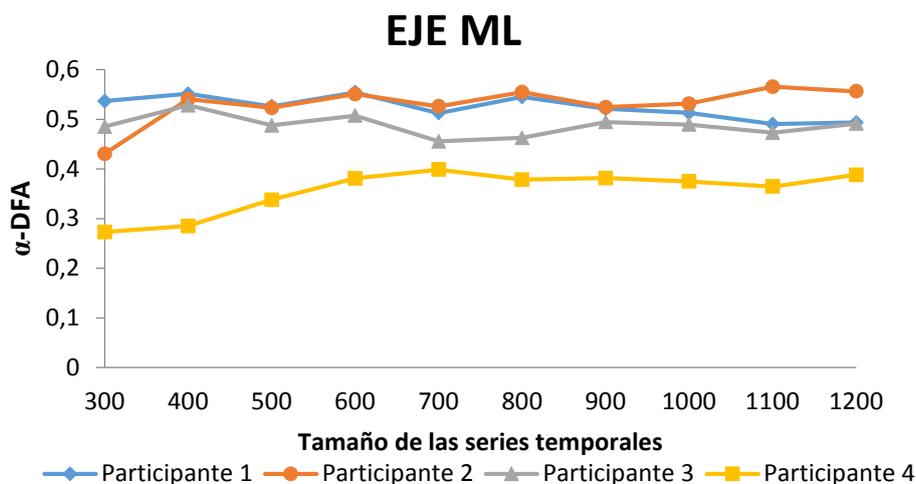


Figura 16. Resultados de autocorrelación de las series temporales de datos en el eje ML en la tarea Con Diana.

Los resultados obtenidos en el eje AP en la tarea con diana (figura 17) mostraron la misma tendencia a los observados en el eje ML para la misma tarea. Los valores de las series temporales de error de todos los participantes se encontraban próximos a 0.5 durante todo el proceso de registro. De igual forma que en los resultados presentados anteriormente, las series temporales en este eje mostraron un cambio de tendencia cuando los datos de las series temporales fueron reducidos por debajo de 600 datos.

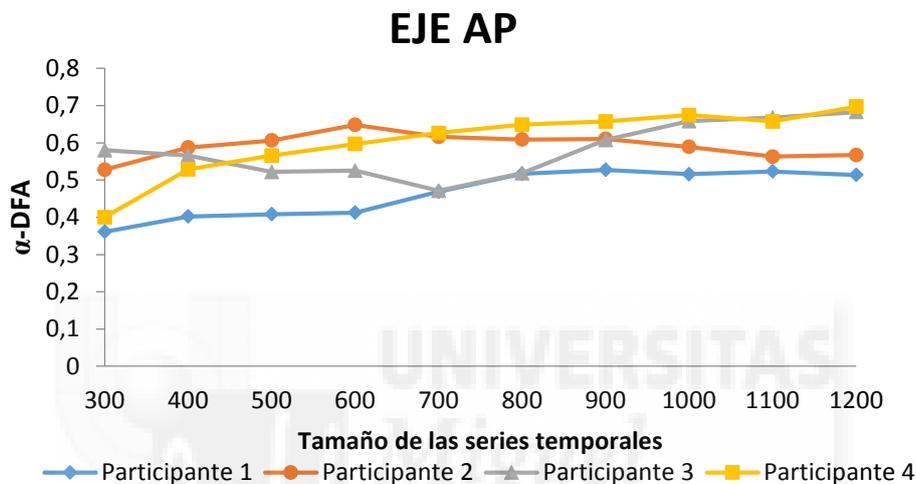


Figura 17. Resultados de autocorrelación de las series temporales de datos en el eje AP en la tarea Con Diana.

4.2 ESTUDIO PRINCIPAL.

Durante la presentación de los datos del estudio experimental de esta tesis doctoral, y para facilitar la comprensión de éstos, se utilizará la denominación de los niveles de la variable dependiente, en lugar de nivel de constreñimientos sobre la precisión Bajo, Medio y Alto, la denominación que define cada una de las situaciones experimentales. Así, se utilizará la denominación de “situación Sin Diana” para referirnos a la situación de nivel Bajo, “situación Con Diana” a la situación de nivel Medio, y “situación Con Recompensa” como las tres situaciones de nivel Alto. Sólo se diferenciarán los tres niveles de aplicación de la recompensa cuando se reflejen los análisis de los resultados entre-grupos.

4.2.1 Resultados descriptivos de las variables de error, autocorrelación y regularidad de todos los participantes en las tareas Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.

Los resultados obtenidos por los participantes en las variables de error, en los ejes ML y AP, y en ERM, así como los resultados obtenidos en la autocorrelación y la regularidad en las variables de las series temporales de error en los ejes ML y AP, ER y TM en la tarea Sin Diana, se presentan en el anexo 1.

Los resultados obtenidos por los participantes en las variables de error, en los ejes ML y AP, y ERM, así como los resultados obtenidos en la autocorrelación y la regularidad en las variables de las series temporales de error en los ejes ML y AP, ER y TM en la tarea Con Diana, se presentan en el anexo 2.

Los resultados obtenidos por los participantes en las variables de error, en los ejes ML y AP, y ERM, así como los resultados obtenidos en la autocorrelación y la regularidad en las variables de las series temporales de error en los ejes ML y AP, ER y TM en la tarea Con Recompensa, se presentan en el anexo 3.

4.2.2 Resultados del análisis inferencial de los valores de las variables de magnitud del error obtenidos en las situaciones Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.

4.2.2.1 Análisis del efecto de las condiciones de ejecución de la tarea sobre las variables de error analizadas.

En la tabla 3 se muestran los promedios de error de las series temporales en los ejes AP y ML y el ERM obtenidos en cada uno de los test realizados por los participantes. El ANOVA de medidas repetidas mostró diferencias significativas entre las situaciones con y sin diana en todas las variables, con un tamaño del efecto moderado tendiendo a grande, especialmente en el eje ML y en el ERM. En términos de rendimiento, se observa una reducción de los valores de error cuando se realiza la tarea con diana. La comparación entre ambas situaciones con diana mostró una reducción de los valores de error cuando se

utilizó una recompensa externa, observándose diferencias significativas en el eje ML ($F_{1,41} = 17.271$; $p = 0.001$; $d = 0.286$), AP ($F_{1,41} = 4.550$; $p = 0.039$; $d = 0.100$) y ERM ($F_{1,41} = 16.416$; $p = 0.001$; $d = 0.286$), mostrando un tamaño del efecto moderado en el eje ML y ERM.

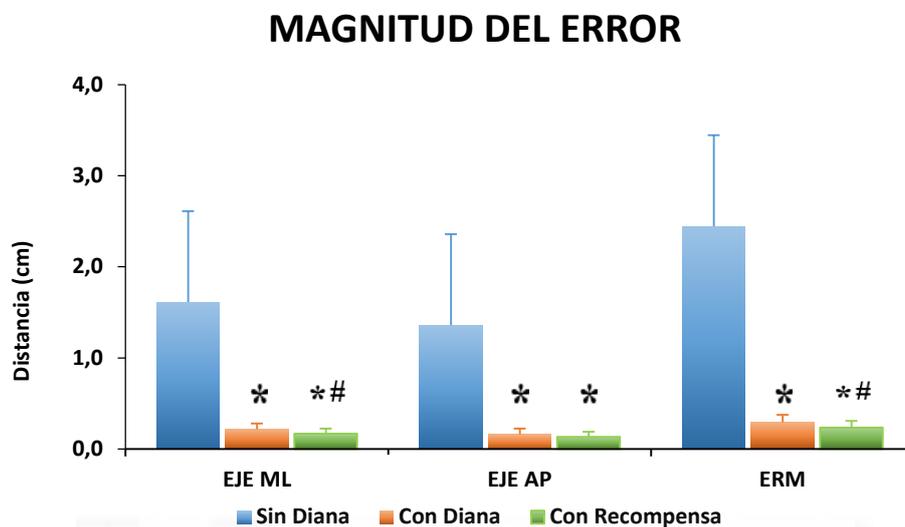


Figura 18. Magnitud del error en función de los conreñimientos de ejecución de la tarea. * Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana $p < 0.05$. # Diferencias significativas respecto a la presencia de diana $p < 0.05$.

Tabla 3. Estadísticos inferenciales de las variables de error en las tres condiciones experimentales.

Magnitud del Error	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2	η_p^2 2-3
ML	1.612 ± 2.207	0.215 ± 0.065 ^A	0.166 ± 0.569 ^{AB}	17.338	<0.001	0.297	0.286
AP	1.359 ± 1.233	0.160 ± 0.063 ^A	0.132 ± 0.056 ^A	40.355	<0.001	0.496	0.100
ERM	2.444 ± 2.307	0.294 ± 0.078 ^A	0.234 ± 0.073 ^{AB}	37.226	<0.001	0.476	0.286

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio.

4.2.2.2 Análisis del efecto de las condiciones de ejecución de la tarea sobre la variabilidad del error.

En la tabla 4 se observan los resultados de la variabilidad del error en cada una de las variables de precisión analizadas. Los resultados de la ANOVA mostraron diferencias significativas en la variabilidad del error con un tamaño del efecto grande en todas las

variables. Se observó una reducción significativa de los valores de variabilidad del error con la introducción de la diana. Igualmente, la introducción de un recompensa en la tarea, provocó una reducción de la variabilidad en el eje ML ($F_{1,41} = 25.696$; $p < 0.001$; $d = 0.385$), AP ($F_{1,41} = 15.957$; $p < 0.001$; $d = 0.427$) y ERM ($F_{1,41} = 30.554$; $p < 0.001$; $d = 0.427$) cuando se compararon ambas situaciones con diana, observándose un tamaño del efecto moderado en todas las variables analizadas.

VARIABILIDAD DEL ERROR

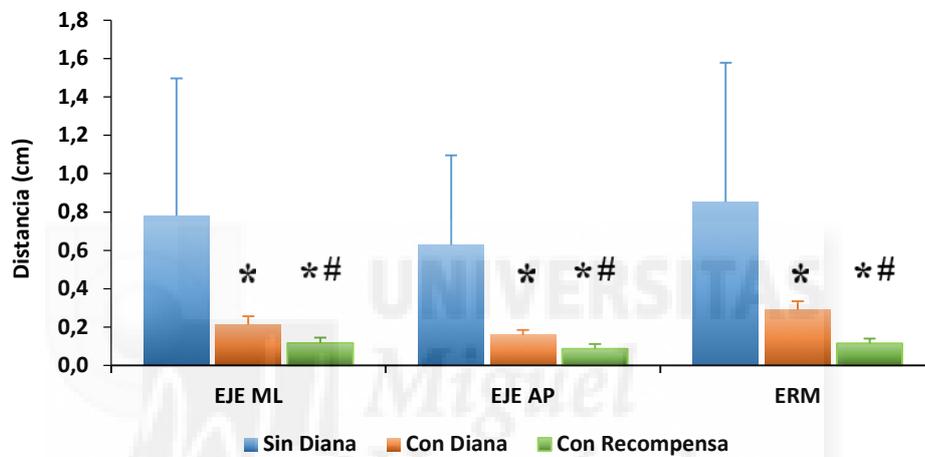


Figura 19. Variabilidad del error en función de los constreñimientos de ejecución de la tarea. * Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana $p < 0.05$. # Diferencias significativas respecto a la presencia de diana $p < 0.05$.

Tabla 4. Estadísticos inferenciales de la variabilidad del error en las tres condiciones experimentales.

Variabilidad del Error	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2	η_p^2 2-3
ML	0.781 ± 0.715	0.153 ± 0.044 ^A	0.117 ± 0.283 ^{AB}	35.167	<0.001	0.462	0.385
AP	0.627 ± 0.467	0.107 ± 0.026 ^A	0.087 ± 0.023 ^{AB}	54.503	<0.001	0.571	0.280
ERM	0.853 ± 0.724	0.152 ± 0.042 ^A	0.115 ± 0.025 ^{AB}	42.597	<0.001	0.510	0.427

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio.

4.2.2.3 *Análisis de las variables de error y tiempo de movimiento en función de la fase inicial, intermedia y final de los ensayos.*

Con la intención de analizar si los valores de las variables dependientes se modificaron a lo largo de los ensayos, se dividió cada bloque de 600 ciclos de ensayos en tres segmentos de 200 datos, obteniendo las fases inicial, intermedia y final. Posteriormente se analizó si existieron diferencias en función de cada sección en todos los sujetos. En la tabla 6 se muestran los promedios de los valores de error para cada una de las secciones en los ejes AP, ML, y el ERM, para las tres situaciones evaluadas. Los resultados mostraron una reducción de rendimiento en todas las tareas con y sin diana a medida que avanzaba la prueba en todas las variables analizadas. Las comparaciones múltiples mostraron únicamente diferencias en el eje AP entre la parte final y la inicial, con un tamaño del efecto moderado en la situación sin diana. Asimismo, el ERM mostró diferencias significativas entre la parte intermedia y final con respecto a la inicial, mostrando un tamaño del efecto moderado. En la tarea con diana se encontraron diferencias significativas en el eje ML entre la fase intermedia y final con la inicial. Igualmente, el ERM mostró diferencias entre la fase intermedia y final con la inicial, y entre la fase final y la intermedia ($F_{1,41} = 9.216$; $p = 0.004$; $d = 0.184$), con un tamaño del efecto moderado. Estas diferencias no se observaron en el eje anteroposterior en esta situación.

Durante la realización de la tarea con recompensa se observaron diferencias significativas entre las tres secciones (inicial, intermedia y final) en las tres variables de error analizadas, con un tamaño del efecto leve. Las comparaciones entre las secciones mostraron diferencias significativas únicamente en el error en el eje ML ($F_{1,41} = 9.642$; $p = 0.003$; $d = 0.190$) y en ERM ($F_{1,41} = 7.876$; $p = 0.008$; $d = 0.161$), comparando la sección final con la inicial y comparando la sección final con la intermedia, con un tamaño del efecto leve.

Tabla 5. Estadísticos inferenciales de los valores de error por fases de las variables de posición en las tres condiciones experimentales.

		<i>Inicial</i>	<i>Intermedia</i>	<i>Final</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2
<i>Error Sin Diana</i>	<i>ML</i>	1.444 ± 1.980	1.673 ± 2.370	1.740 ± 2.461	1.938	0.151	0.045
	<i>AP</i>	1.138 ± 0.989	1.395 ± 1.414	1.468 ± 1.453 ^A	6.163	0.003	0.131
	<i>ERM</i>	2.091 ± 2.046	2.542 ± 2.494 ^A	2.692 ± 2.551 ^A	8.120	0.001	0.165
<i>Error Con Diana</i>	<i>ML</i>	0.201 ± 0.066	0.217 ± 0.066 ^A	0.224 ± 0.068 ^A	16.192	<0.001	0.283
	<i>AP</i>	0.153 ± 0.063	0.160 ± 0.065	0.167 ± 0.068	4.234	0.018	0.094
	<i>ERM</i>	0.278 ± 0.077	0.296 ± 0.080 ^A	0.308 ± 0.083 ^{AB}	16.667	<0.001	0.289
<i>Error Recompensa</i>	<i>ML</i>	0.161 ± 0.056	0.163 ± 0.053	0.175 ± 0.065 ^{AB}	3.418	0.001	0.159
	<i>AP</i>	0.128 ± 0.057	0.134 ± 0.061	0.139 ± 0.059	7.746	0.038	0.077
	<i>ERM</i>	0.227 ± 0.069	0.233 ± 0.072	0.246 ± 0.081 ^{AB}	7.529	0.001	0.155

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a parte inicial. ^B Diferencias significativas respecto a la parte media.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio.

4.2.2.4 Valores de correlación en las variables de error en los test Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.

En el análisis de correlación entre las variables de rendimiento de los test realizados, únicamente se observaron correlaciones significativas positivas entre los errores en los ejes ML y AP con el ERM en la misma situación, no correlacionando con las variables de error de las otras situaciones analizadas (tabla 6). La ausencia de relación entre las variables de error de las diferentes tareas evaluadas revela diferentes formas de afectación sobre los participantes de los condicionantes de la tarea, provocando una distribución diferente para cada situación.

Tabla 6. Correlaciones entre las variables de error en las tres tareas realizadas

	<i>Sin diana</i>			<i>Con diana</i>			<i>Recompensa</i>		
	<i>ML</i>	<i>AP</i>	<i>ERM</i>	<i>ML</i>	<i>AP</i>	<i>ERM</i>	<i>ML</i>	<i>AP</i>	<i>ERM</i>
<i>Sin Diana</i>	<i>ML</i>	0.90	.897**	.017	.101	-.080	-.167	.050	-.076
	<i>AP</i>		.511**	.087	.111	.115	-.151	-.173	-.198
	<i>ERM</i>			.002	.036	-.036	-.211	-.017	-.143
<i>Con Diana</i>	<i>ML</i>				.236	.809**	.246	-.039	.125
	<i>AP</i>					.758**	.300	-.037	.182
	<i>ERM</i>						.363*	-.054	.202
<i>Recompensa</i>	<i>ML</i>							.375*	.860**
	<i>AP</i>								.794**
	<i>ERM</i>								

*Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.05$.

**Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.01$.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio.

4.2.3 Análisis del efecto de las condiciones experimentales sobre las dinámicas de la estructura de la variabilidad.

4.2.3.1 Análisis del efecto de las tres condiciones experimentales en los valores de regularidad de las series temporales de error y tiempo de movimiento.

Con la intención de identificar los efectos provocados por los constreñimientos de ejecución de la tarea, se realizó un ANOVA de medidas repetidas con el objetivo de conocer la influencia de la ejecución de las distintas situaciones experimentales sobre los valores de regularidad del error y el tiempo de movimiento.

En la tabla 7 se muestran los estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos en las tres condiciones experimentales, en las series temporales de error y en el tiempo de movimiento. El ANOVA mostró un descenso significativo en la regularidad de las series temporales de error comparando las distintas situaciones experimentales realizadas, observándose un tamaño del efecto grande en estas variables. El TM mostró valores similares en las tres condiciones experimentales, no observándose diferencias en esta

variable. En las comparaciones múltiples se observó un significativo descenso de la regularidad de las series temporales de error en el eje ML ($F_{1,41} = 196.986$; $p < 0.001$; $d = 0.828$), eje AP ($F_{1,41} = 122.829$; $p < 0.001$; $d = 0.750$) y en el ER ($F_{1,41} = 190.031$; $p < 0.001$; $d = 0.823$) cuando la tarea se realizó ajustándose a una diana. Igualmente, comparando las situaciones con diana con recompensa se observaron diferencias significativas en el eje ML ($F_{1,41} = 8.148$; $p = 0.007$; $d = 0.166$), AP ($F_{1,41} = 6.939$; $p = 0.012$; $d = 0.145$) y ER ($F_{1,41} = 5.386$; $p = 0.025$; $d = 0.116$), no observándose diferencias en el TM ($F_{1,41} = 0.033$; $p = 0.856$; $d = 0.001$).

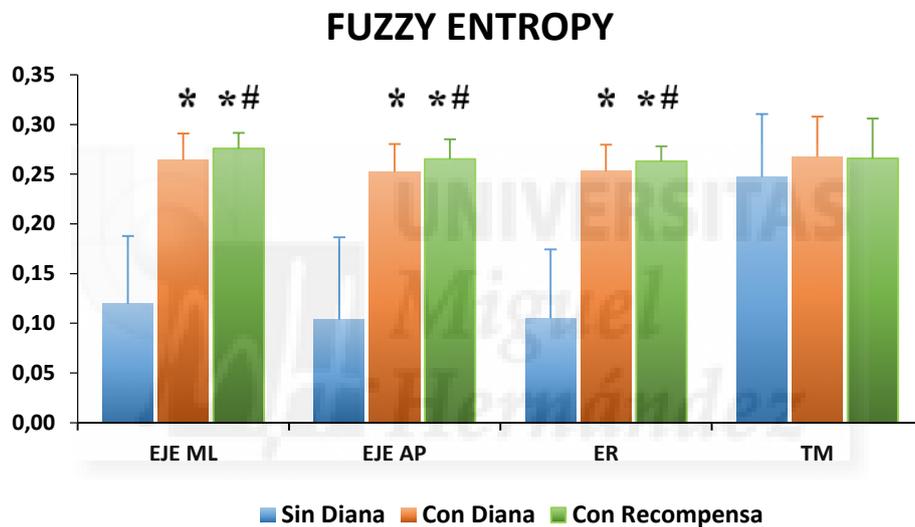


Figura 20. Regularidad de las series temporales de error y el tiempo de movimiento en función de los constreñimientos de ejecución de las tareas. * Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana $p < 0.05$. # Diferencias significativas respecto a la presencia de diana $p < 0.05$.

Tabla 7. Estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos en los test en las variables de error y tiempo de movimiento en las tres condiciones experimentales.

<i>FuzzyEn</i>	<i>Sin Diana</i>	<i>Con Diana</i>	<i>Con Recompensa</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2
ML	0.119 ± 0.06	0.263 ± 0.026 ^A	0.275 ± 0.015 ^{AB}	188.068	<0.001	0.821
AP	0.103 ± 0.082	0.252 ± 0.079 ^A	0.265 ± 0.019 ^{AB}	128.449	<0.001	0.758
ER	0.105 ± 0.069	0.253 ± 0.026 ^A	0.262 ± 0.015 ^{AB}	186.706	<0.001	0.820
TM	0.247 ± 0.063	0.267 ± 0.040	0.265 ± 0.040	2.985	0.056	0.068

ANOVA de medidas repetidas.
 Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.
 ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial

4.2.3.2 Análisis del efecto de las tres condiciones experimentales en los valores de autocorrelación de las series temporales de error y tiempo de movimiento.

En la tabla 8 se muestran los estadísticos descriptivos con los promedios de los valores de autocorrelación de las variables analizadas para las tres situaciones de intervención. El ANOVA mostró diferencias significativas en los valores de autocorrelación de las series temporales de las variables ML, AP y ER. No obstante, no se encontraron diferencias en los valores de autocorrelación de ninguna de las situaciones en el TM. Las comparaciones múltiples mostraron diferencias significativas entre los valores de autocorrelación de las situaciones con y sin diana, observándose menores valores de autocorrelación con la introducción de la diana en todas las variables. En la situación sin diana, el parámetro α mostró valores próximos a 1, mientras que al introducir la diana, ese parámetro se redujo hacia valores próximos a 0.5. Comparando las situaciones con diana con y sin recompensa, únicamente se encontraron diferencias significativas en el eje AP ($F_{1,41} = 8.952$; $p = 0.005$; $d = 0.179$), reduciéndose ligeramente los valores de α , aunque manteniéndose próximos a 0.5, con un tamaño del efecto pequeño. Es de destacar que sólo se encontraron en este sentido diferencias en el eje ML, en el que además mostró

valores más alejados de 0.5 en la situación con diana, comparada con la situación con recompensa.

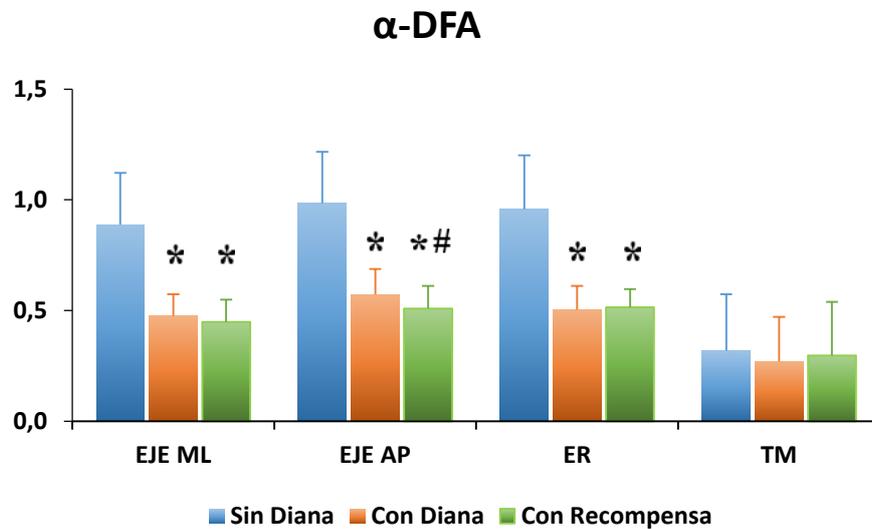


Figura 21. Autocorrelación de las series temporales de error y el tiempo de movimiento en función de los constreñimientos de ejecución de las tareas. * Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana $p < 0.05$. # Diferencias significativas respecto a la presencia de diana $p < 0.05$.

Tabla 8. Estadísticos inferenciales de los valores de autocorrelación de las variables de posición y tiempo de movimiento obtenidos en cada una de las tareas.

DFA	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2	η_p^2 2-3
ML	0.887 ± 0.234	0.475 ± 0.098 ^A	0.447 ± 0.101 ^A	112.599	<0.001	0.733	0.061
AP	0.985 ± 0.232	0.571 ± 0.115 ^A	0.509 ± 0.101 ^{AB}	111.712	<0.001	0.732	0.179
ER	0.957 ± 0.243	0.502 ± 0.108 ^A	0.514 ± 0.081 ^A	114.957	<0.001	0.737	0.009
TM	0.319 ± 0.254	0.271 ± 0.200	0.297 ± 0.242	0.743	0.479	0.018	0.013

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial

4.2.3.3 Análisis de los valores de autocorrelación de las series temporales de error y tiempo de movimiento segmentado en fases inicial, intermedia y final.

Al igual que se hizo en el análisis de las variables de error, se dividieron los ensayos de 600 ciclos en tres secciones de 200 datos con el objetivo de analizar si los valores de la

estructura de las series temporales variaba en función de la sección inicial, intermedia, o final. En la tabla 9 se muestran los estadísticos descriptivos de los valores de autocorrelación de las series temporales de error y tiempo de movimiento segmentado en tres fases. El ANOVA de medidas repetidas mostró diferencias significativas en los valores de autocorrelación únicamente en el eje AP en las situaciones sin diana y con diana. No obstante, las comparaciones múltiples mostraron únicamente diferencias entre las secciones intermedia y final, en el eje AP ($F_{1,41} = .017$; $p = 0.006$; $d = 0.174$) de la situación sin diana, mostrando un tamaño del efecto leve. La situación con recompensa no mostró diferencias en los valores de autocorrelación entre las tres fases analizadas.

Tabla 9. Estadísticos inferenciales de los valores de autocorrelación de las variables de posición y tiempo de movimiento por ventanas en las tres condiciones experimentales.

	DFA	Inicial	Media	Final	F	p	η_p^2
Sin Diana	ML	0.798 ± 0.302	0.811 ± 0.304	0.813 ± 0.295	0.554	0.554	0.014
	AP	0.882 ± 0.296	0.874 ± 0.298	0.833 ± 0.289 ^B	3.713	0.029	0.083
	ER	0.843 ± 0.301	0.853 ± 0.318	0.843 ± 0.585	0.171	0.843	0.004
	TM	0.251 ± 0.193	0.247 ± 0.183	0.253 ± 0.183	0.071	0.931	0.002
Con Diana	ML	0.479 ± 0.162	0.491 ± 0.153	0.501 ± 0.157	1.241	0.295	0.029
	AP	0.543 ± 0.160	0.568 ± 0.183	0.581 ± 0.195	3.641	0.031	0.082
	ER	0.536 ± 0.166	0.537 ± 0.162	0.536 ± 0.158	0.004	0.996	0.000
	TM	0.219 ± 0.193	0.203 ± 0.129	0.239 ± 0.157	1.598	0.209	0.038
Recompensa	ML	0.418 ± 0.118	0.429 ± 0.116	0.432 ± 0.110	0.712	0.494	0.017
	AP	0.471 ± 0.112	0.489 ± 0.135	0.501 ± 0.125	2.622	0.079	0.060
	ER	0.482 ± 0.117	0.490 ± 0.121	0.493 ± 0.111	0.500	0.608	0.012
	TM	0.291 ± 0.233	0.289 ± 0.222	0.269 ± 0.218	1.479	0.234	0.035

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a parte inicial. ^B Diferencias significativas respecto a la parte media.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial

En la tabla 9 se pueden observar los resultados del análisis inferencial. El ANOVA mostró diferencias significativas en la comparación de los valores de autocorrelación en el eje ML de la fase inicial de las tareas con diana y con recompensa ($_{1,41}F = 5.104$; $p = 0.029$; $d = 0.111$). Estos resultados significativos fueron similares en la comparación de las fases intermedias ($F_{1,41} = 6.717$; $p = 0.013$; $d = 0.141$) y fases finales ($F_{1,41} = 5.563$; $p = 0.023$; $d = 0.119$), mostrando menores valores de autocorrelación en todas las fases cuando la tarea

se realizaba con recompensa. Estas diferencias significativas también se observaron en la comparación de las fases inicial ($F = 7.654$; $p = 0.008$; $d = 0.157$), intermedia ($F_{1,41} = 6.489$; $p = 0.015$; $d = 0.137$) y final ($F_{1,41} = 6.827$; $p = 0.012$; $d = 0.143$) de los valores de autocorrelación en el eje AP, observándose igualmente valores menos autocorrelacionados en la tarea con recompensa. No se observaron diferencias significativas en las comparaciones de las secciones en el ER de las tareas con diana y con recompensa, aunque igualmente en la tarea con recompensa se mostraron valores menos autocorrelacionados. El TM únicamente mostró diferencias significativas entre las fases inicial ($F_{1,41} = 4.409$; $p = 0.042$; $d = 0.097$) e intermedia ($F_{1,41} = 7.212$; $p = 0.010$; $d = 0.150$). Al contrario que en las variables de error, el TM mostró valores más correlacionados cuando la tarea era realizada con recompensa.

4.2.4 Análisis del efecto de las condiciones experimentales sobre las dinámicas de la estructura de la variabilidad en las variables de ejecución del movimiento.

4.2.4.1 Valores de regularidad de las series temporales en las variables de ejecución del movimiento. Análisis de la posición de la mano en función de las tres condiciones experimentales.

Con la intención de identificar los efectos provocados por las condiciones de ejecución de la tarea, se realizó un ANOVA de medidas repetidas con el objetivo de conocer la influencia de la ejecución de las distintas situaciones experimentales sobre los valores de regularidad de las posiciones de la mano.

En la tabla 10 se muestran los estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos de las series temporales de los ángulos azimut, elevación y rotación en las tres situaciones de registro. El ANOVA mostró diferencias significativas en la regularidad de la posición de la mano entre las diferentes condiciones de la tarea en todas las variables analizadas. Se observó una disminución de los valores de regularidad obtenidos en los

ángulos cuando los test fueron realizados bajo la influencia de un constreñimiento al tener que ajustarse a una diana. El incremento del nivel de constreñimiento cuando la tarea fue realizada ajustándose a una diana y con una recompensa, mostró una disminución mayor de la regularidad en todas las variables. Las comparaciones múltiples mostraron diferencias significativas en todas las variables de posición entre la tarea sin constreñir (sin diana) y la tarea constreñida por una diana. El incremento del nivel de constreñimiento al realizar la tarea ajustándose a una diana y con recompensa igualmente mostró diferencias significativas con la tarea sin constreñir en todas las variables de posición. La comparación de las dos tareas constreñidas a una diana y a una diana con recompensa sólo mostró diferencias significativas en el ángulo azimut, no observándose estas diferencias en elevación y rotación.

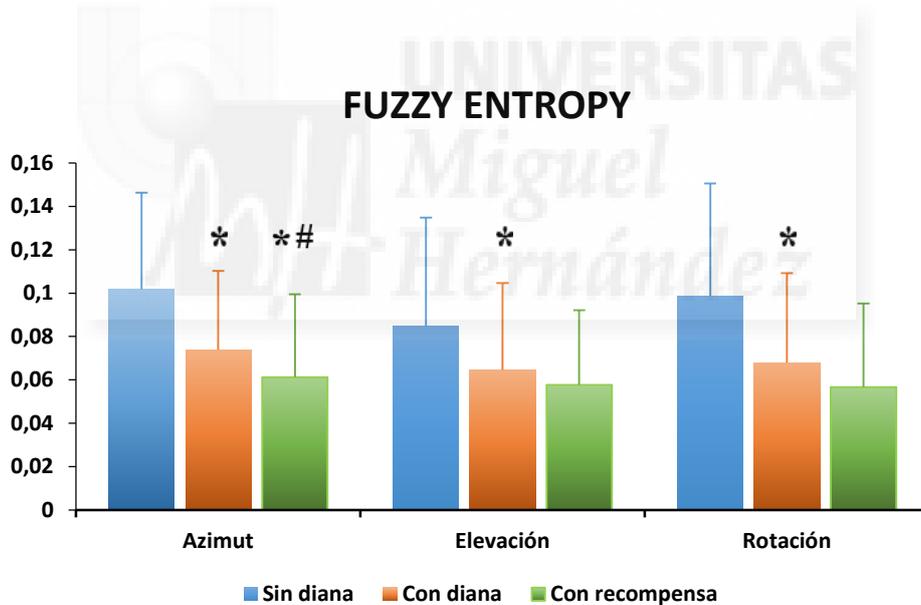


Figura 22. Regularidad de la orientación de la mano en el momento del punteo en función de los constreñimientos de ejecución de las tareas. * Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana $p < 0.05$. # Diferencias significativas respecto a la presencia de diana $p < 0.05$.

Tabla 10. Estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos en los test en las variables de azimut, elevación y rotación en las tres condiciones experimentales.

FuzzyEn	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2
Azimut	0.101 ± 0.044	0.073 ± 0.036 ^A	0.061 ± 0.038 ^{AB}	24.056	<0.001	0.370
Elevación	0.084 ± 0.050	0.064 ± 0.040 ^A	0.057 ± 0.034 ^A	7.789	0.008	0.160
Rotación	0.098 ± 0.051	0.068 ± 0.041 ^A	0.056 ± 0.038 ^A	15.947	<0.001	0.280

ANOVA de medidas repetidas.
 Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

4.2.4.2 Valores de autocorrelación de las series temporales en las variables de ejecución del movimiento. Análisis de la posición de la mano en función de las tres condiciones experimentales.

Con el objetivo de conocer si la ejecución de las distintas situaciones experimentales afectó a los valores de autocorrelación de las posiciones de la mano se realizó un ANOVA de medidas repetidas para analizar los efectos provocados por las condiciones de ejecución de la tarea.

En la tabla 11 se muestran los promedios de los valores de autocorrelación de las series temporales de los ángulos azimut, elevación y rotación de la mano en el momento del impacto del estilete con la superficie. Los resultados mostraron diferencias significativas en las series temporales entre las tres situaciones de registro, con un tamaño del efecto de moderado en la variable azimut y pequeño en elevación y rotación. Las comparaciones múltiples mostraron diferencias significativas en azimut entre las situaciones sin diana y con diana ($F_{1,41} = 15.790$; $p < 0.001$; $d = 0.278$). Igualmente, se observaron diferencias significativas entre la situación sin diana y la situación con recompensa ($F_{1,41} = 26.532$; $p < 0.001$; $d = 0.393$). En elevación se encontraron diferencias significativas entre las situaciones sin diana y con recompensa ($F_{1,41} = 19.063$; $p < 0.001$; $d = 0.317$). En rotación se encontraron diferencias significativas entre las situaciones sin diana y con recompensa ($F_{1,41} = 20.245$; $p < 0.001$; $d = 0.331$) y las situaciones con diana y con recompensa ($F_{1,41} =$

8.943; $p = 0.005$; $d = 0.179$). Se observa en general un incremento de los valores de autocorrelación cuando la tarea era realizada ajustándose a una diana, observándose valores más autocorrelacionados cuando la situación era realizada con recompensa.

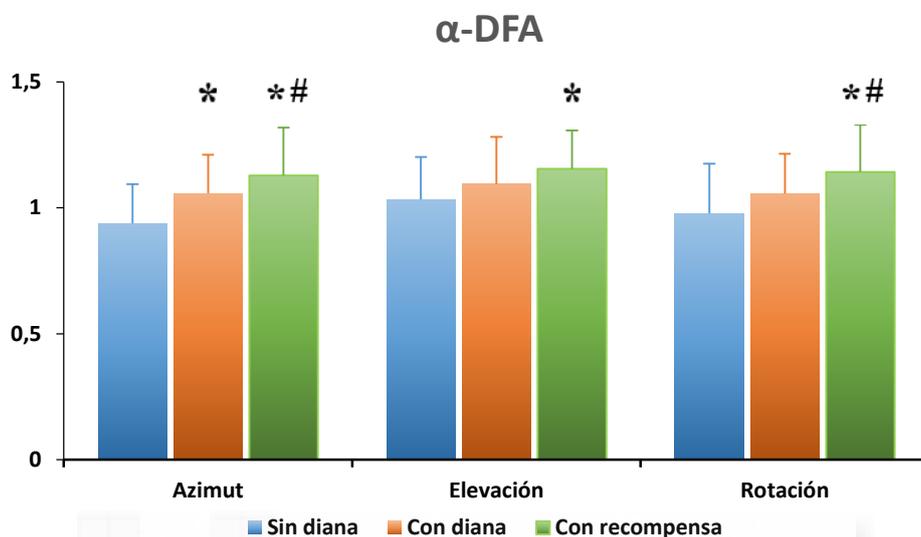


Figura 23. Regularidad de la orientación de la mano en el momento del punteo en función de los constreñimientos de ejecución de las tareas. * Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana $p < 0.05$. # Diferencias significativas respecto a la presencia de diana $p < 0.05$.

Tabla 11. Estadísticos inferenciales de los valores de autocorrelación de los ángulos de la mano en las tres tareas realizadas.

DFA	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2
Azimut	0.939 ± 0.155	1.057 ± 0.154 ^A	1.128 ± 0.191 ^{AB}	17.389	<0.001	0.298
Elevación	1.033 ± 0.168	1.094 ± 0.188	1.156 ± 0.151 ^A	5.912	0.004	0.126
Rotación	0.978 ± 0.197	1.057 ± 0.158	1.143 ± 0.188 ^{AB}	11.394	0.002	0.217

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

4.2.5 Efectos de la manipulación de la evolución de la recompensa en el tiempo sobre el rendimiento, la regularidad y la autocorrelación en la tarea con recompensa.

4.2.5.1 Análisis del efecto de la manipulación de la evolución de la recompensa sobre el rendimiento en la tarea.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en los análisis estadísticos en las variables de rendimiento, autocorrelación y regularidad mostrados por los participantes en el estudio en función del grupo experimental en que realizaron la tarea con recompensa. Los resultados en las variables de rendimiento son presentados por minuto, coincidiendo con el momento en que el feedback era ofrecido a los participantes, con la finalidad de observar las fluctuaciones del error radial y la desviación típica mostrados por los participantes durante la tarea y cómo estos resultados pueden verse afectados en función del grupo experimental.

Los estadísticos descriptivos de los valores del error radial y la desviación típica obtenidos cada minuto, así como el error radial medio en la tarea por cada uno de los participantes que participaron en el estudio coincidiendo con el momento en el que era presentado el feedback se presentan en el anexo 8 de esta tesis.

Los resultados obtenidos por minuto en cada uno de los grupos en función del nivel de constreñimiento en que realizaron la tarea fueron analizados con el objetivo de comprobar el efecto de los diferentes niveles de constreñimiento sobre el rendimiento en la tarea.

En la tabla 12 se muestran los estadísticos de los valores de error radial medio y la desviación típica obtenida por minuto por los tres grupos experimentales. El análisis inferencial del error por minuto no mostró diferencias significativas en función del nivel de constreñimiento en la recompensa proporcionado a cada uno de los grupos en que fue dividida la totalidad de la muestra.

Tabla 12. Estadísticos inferenciales del error radial por minuto mostrado por los participantes en función de la situación experimental.

Error radial minuto 1			Error radial minuto 2		
1	2	3	1	2	3
0.21 ± 0.06	0.24 ± 0.08	0.22 ± 0.05	0.21 ± 0.07	0.24 ± 0.10	0.23 ± 0.07
$F_{2,39} = .954; p = .394$			$F_{2,39} = .474; p = .624$		
Error radial minuto 3			Error radial minuto 4		
1	2	3	1	2	3
0.22 ± 0.07	0.24 ± 0.10	0.22 ± 0.05	0.22 ± 0.06	0.24 ± 0.10	0.23 ± 0.05
$F_{2,39} = .402; p = .672$			$F_{2,39} = .234; p = .792$		
Error radial minuto 5			Error radial minuto 6		
1	2	3	1	2	3
0.22 ± 0.07	0.25 ± 0.10	0.22 ± 0.04	0.22 ± 0.07	0.26 ± 0.10	0.23 ± 0.04
$F_{2,39} = .857; p = .432$			$F_{2,39} = 1.038; p = .364$		
Error radial minuto 7			Error radial minuto 8		
1	2	3	1	2	3
0.22 ± 0.07	0.26 ± 0.10	0.24 ± 0.06	0.22 ± 0.06	0.27 ± 0.11	0.25 ± 0.07
$F_{2,39} = .706; p = .500$			$F_{2,39} = 1.153; p = .326$		
Error radial minuto 9			Error radial minuto 10		
1	2	3	1	2	3
0.22 ± 0.07	0.27 ± 0.11	0.25 ± 0.08	0.22 ± 0.07	0.27 ± 0.10	0.25 ± 0.07
$F_{2,39} = .865; p = .429$			$F_{2,39} = 1.724; p = .192$		
Error Radial Medio					
1	2	3			
0.22 ± 0.07	0.26 ± 0.10	0.23 ± 0.05			
$F_{2,39} = .880; p = .423$					

ANOVA de un factor inter-sujeto
 Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa¹. ^B Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa ².

En la tabla 13 se muestran los resultados del error y desviación típica obtenidos en los ejes ML y AP, así como en el ERM en las fases inicial, intermedia y final de la tarea en función de cada nivel de constreñimiento a que fue sometido cada grupo experimental. Los resultados del ANOVA no mostraron diferencias significativas en las variables analizadas al comparar los tres niveles de constreñimiento en la tarea con recompensa en las fases inicial, intermedia y final de la tarea. La comparación entre las fases no mostró diferencias significativas en ninguna de las variables analizadas.

Tabla 13. Estadísticos descriptivos de los valores de error obtenidos en cada una de las fases en función de la situación experimental realizada.

ERROR	Nivel de Recompensa	Inicial	Intermedia	Final
ML	1	0.13 ± 0.06	0.13 ± 0.06	0.13 ± 0.05
	2	0.12 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.12 ± 0.04
	3	0.14 ± 0.07	0.15 ± 0.09	0.16 ± 0.08
AP	1	0.16 ± 0.06	0.17 ± 0.06	0.18 ± 0.06
	2	0.14 ± 0.03	0.14 ± 0.04	0.15 ± 0.05
	3	0.18 ± 0.07	0.18 ± 0.06	0.20 ± 0.09
ERM	1	0.23 ± 0.07	0.24 ± 0.06	0.25 ± 0.06
	2	0.21 ± 0.03	0.20 ± 0.04	0.21 ± 0.05
	3	0.25 ± 0.09	0.26 ± 0.10	0.28 ± 0.11

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio.

4.2.5.2 Análisis del efecto de la manipulación de la evolución de la recompensa en el tiempo sobre la regularidad de la estructura de la variabilidad.

La regularidad mostrada por las series temporales de las variables de rendimiento y el TM mostraron resultados muy similares en los tres grupos experimentales obteniendo baja regularidad en todas las variables y no viéndose alterados estos resultados por el grupo experimental en que fue realizada la tarea.

En la tabla 14 se muestran los valores de regularidad obtenidos por cada grupo experimental en las series temporales de error en el eje ML y AP, así como en las series temporales del ER y el TM. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas en la regularidad de las series temporales de las variables analizadas en función de la situación experimental realizada. Al igual que en los análisis de error y autocorrelación, la comparación por pares no mostró diferencias en ninguna de las variables analizadas. Los resultados de *ApEn* y *SampEn* realizados en el análisis son presentados como anexos 9 y 10 en esta tesis.

Tabla 14. Estadísticos inferenciales de los resultados de regularidad mostrados por los participantes en las variables analizadas en función de la situación experimental realizada.

FuzzyEn	Recompensa			F	p
	1	2	3		
ML	0.280 ± 0.010	0.277 ± 0.011	0.271 ± 0.024	.677	.514
AP	0.268 ± 0.013	0.264 ± 0.021	0.263 ± 0.025	.265	.768
ER	0.268 ± 0.011	0.262 ± 0.012	0.258 ± 0.021	1.654	.204
TM	0.266 ± 0.048	0.277 ± 0.020	0.255 ± 0.0465	1.026	.368

ANOVA de un factor inter-sujeto.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa¹. ^B Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa².

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial; TM = Tiempo de movimiento.

4.2.5.3 Análisis del efecto de la evolución de la recompensa en el tiempo sobre la autocorrelación de la estructura de la variabilidad.

Los resultados de autocorrelación de las variables analizadas mostraron valores no correlacionados próximos a ruido blanco en las series temporales de las variables de error en las tres situaciones experimentales. Estos resultados fueron mucho más anti-persistentes en las series temporales del TM, donde la trayectoria tiende a volver desde donde partió con el objetivo de tratar de ajustarse a la frecuencia presentada por el metrónomo, siendo ésta una variable controlada en todo el estudio.

En la tabla 15 se muestran los resultados de autocorrelación de las series temporales de error en los ejes ML y AP, así como en las series temporales del ER y TM obtenidos por cada uno de los grupos experimentales. Los valores de autocorrelación de las variables analizadas no mostraron diferencias significativas en función del nivel de constreñimiento al que fue sometido cada grupo experimental. Igualmente, en la comparación por pares entre los niveles de constreñimiento a que fue sometido cada grupo no se observaron diferencias entre ninguna de las variables analizadas.

Tabla 15. Estadísticos inferenciales de los valores de autocorrelación de las variables analizadas en función de la situación experimental realizada.

DFA	Recompensa			F	p
	1	2	3		
ML	0.43 ± 0.09	0.44 ± 0.11	0.48 ± 0.11	1.018	.371
AP	0.50 ± 0.09	0.50 ± 0.12	0.53 ± 0.10	.291	.749
ER	0.50 ± 0.06	0.53 ± 0.10	0.52 ± 0.09	.458	.636
TM	0.30 ± 0.27	0.24 ± 0.16	0.35 ± 0.29	.728	.489

ANOVA de un factor inter-sujeto

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa¹. ^B Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa ².

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial; TM = Tiempo de movimiento.

En la tabla 16 se muestran los resultados de autocorrelación obtenidos de las series temporales de error en los ejes ML y AP, así como en ER y el TM en función de la situación experimental realizada en las fases inicial, media y final. Los resultados del ANOVA no mostraron diferencias entre las fases analizadas en ninguna de las variables. Igualmente, la comparación por pares no mostró diferencias entre las partes en que se dividía las series temporales en función de la situación experimental realizada.

Tabla 16. Estadísticos descriptivos de los valores de autocorrelación obtenidos en cada una de las fases en función de la situación experimental realizada.

DFA	Recompensa	Inicial	Intermedia	Final
ML	1	0.42 ± 0.14	0.41 ± 0.12	0.40 ± 0.08
	2	0.40 ± 0.06	0.41 ± 0.08	0.42 ± 0.09
	3	0.44 ± 0.14	0.47 ± 0.14	0.49 ± 0.14
AP	1	0.47 ± 0.10	0.47 ± 0.12	0.50 ± 0.12
	2	0.45 ± 0.12	0.47 ± 0.13	0.48 ± 0.15
	3	0.50 ± 0.12	0.52 ± 0.15	0.53 ± 0.11
ER	1	0.51 ± 0.10	0.49 ± 0.11	0.48 ± 0.08
	2	0.45 ± 0.11	0.50 ± 0.13	0.52 ± 0.12
	3	0.49 ± 0.14	0.48 ± 0.14	0.48 ± 0.14
TM	1	0.29 ± 0.18	0.30 ± 0.20	0.30 ± 0.24
	2	0.24 ± 0.17	0.24 ± 0.17	0.20 ± 0.13
	3	0.35 ± 0.33	0.33 ± 0.29	0.31 ± 0.27

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial; TM = Tiempo de movimiento.

4.2.6 *Relación entre complejidad y rendimiento obtenido en las situaciones Sin Diana, Con Diana y Con Recompensa.*

4.2.6.1 *Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento obtenidos en la situación Sin Diana.*

Con el objetivo de analizar las posibles relaciones entre la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y rendimiento obtenido en la tarea sin constreñir, se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer la intensidad y el sentido de las relaciones.

La comparación de los valores de autocorrelación con el error mostraron correlaciones positivas significativas entre las variables de autocorrelación en el eje ML y los resultados obtenidos de error en eje ML ($r = .527$; $p = 0.001$) y el ER ($r = .554$; $p = 0.001$). Igualmente, se observaron correlaciones significativas positivas entre los valores autocorrelación en el eje AP y el error obtenido en el eje AP ($r = .454$; $p = 0.001$) y el ER ($r = .461$; $p = 0.001$).

El análisis de los resultados entre los valores de regularidad y autocorrelación mostraron correlaciones significativas negativas entre todas las variables. Estos resultados indican que altos valores de autocorrelación corresponderían a menor complejidad y viceversa (tabla 17).

Tabla 17. Correlaciones entre las variables de autocorrelación, regularidad y rendimiento en la situación Sin Diana

		Sin Diana								
		DFA			FuzzyEn			ERROR		
		ML	AP	ER	ML	AP	ER	ML	AP	ERM
Sin Diana	DFA	ML	.664**	.802**	-.821**	-.692**	-.768**	.527**	.262	.554**
		AP		.779**	-.671**	-.858**	-.749**	.300	.454**	.461**
		ER			-.768**	-.790**	-.903**	.408**	.444**	.549**
	FuzzyEn	ML				.825**	.865**	-.526**	-.388*	-.603**
		AP					.880**	-.328*	-.603**	-.538**
		ER						-.387**	-.589**	-.586**
	ERROR	ML							.090	.897**
		AP								.511**
		ERM								

*Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.05$.

**Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.01$.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio; ER = Error radial

4.2.6.2 Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento obtenidos en la situación Con Diana.

Con el objetivo de analizar las posibles relaciones entre la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y el rendimiento obtenido en la tarea constreñida a una diana, se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer la intensidad y el sentido de las relaciones.

El análisis de las correlaciones entre las variables de autocorrelación no mostró correlaciones con ninguna de las variables de rendimiento en la situación con diana. Al igual que en la situación sin diana todas las variables de autocorrelación obtuvieron correlaciones negativas significativas con todas las variables de complejidad (tabla 18). Por otro lado, el análisis de los valores de complejidad, al igual que en los valores de autocorrelación, no mostraron correlación alguna con ninguna de las variables de rendimiento.

Las variables de rendimiento mostraron correlaciones positivas significativas entre el error en el eje ML ($r = .809$; $p = 0.001$) y el error en eje AP ($r = .758$; $p = 0.001$) con el ERM. No se obtuvieron correlaciones entre los errores de ambos ejes.

Tabla 18. Correlaciones entre las variables de autocorrelación, regularidad y rendimiento en la situación Con Diana.

		Con Diana								
		DFA			FuzzyEn			ERROR		
		ML	AP	ER	ML	AP	ER	ML	AP	ERM
Con Diana	DFA	ML	.394**	.588**	-.573**	-.419**	-.599**	-.058	.110	.022
		AP		.487**	-.361*	-.478**	-.462**	-.016	-.209	-.133
		ER			-.476**	-.411**	-.531**	-.184	-.074	-.164
	FuzzyEn	ML				.742**	.861**	-.123	.031	-.061
		AP					.740**	-.043	.123	.036
		ER						.024	.049	.037
	ERROR	ML							.236	.809**
		AP								.758**
		ERM								

*Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.05$.

**Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.01$.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio; ER = Error radial

4.2.6.3 Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento obtenidos en la situación Con Recompensa.

Con el objetivo de analizar las posibles relaciones entre la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y el rendimiento obtenido en la tarea constreñida a una diana y con recompensa, se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer la intensidad y el sentido de las relaciones.

El análisis de los valores de correlación obtenidos en la situación con diana y recompensa mostró correlaciones negativas significativas entre todas las variables de autocorrelación y regularidad (tabla 19). No se encontraron correlaciones entre las variables de autocorrelación y rendimiento.

Al igual que en la anterior situación con diana, las variables de regularidad no mostraron correlación con ninguna de las variables de rendimiento analizadas.

Respecto a las variables de rendimiento, únicamente se encontraron correlaciones positivas significativas entre el error en el eje ML ($r = .809$; $p = 0.001$) y el error en eje AP ($r = .758$; $p = 0.001$) con el ERM. No se obtuvieron correlaciones entre los errores de ambos ejes.

Tabla 19. Correlaciones entre las variables de autocorrelación, regularidad y rendimiento en la situación Con Diana y Con Recompensa.

		Con Recompensa								
		DFA			FuzzyEn			ERROR		
		ML	AP	ER	ML	AP	ER	ML	AP	ERM
Con Recompensa	DFA	ML	.575**	.500**	-.559**	-.516**	-.392*	.075	-.102	-.006
		AP		.455**	-.301	-.498**	-.416**	.139	.084	.128
		ER			-.406**	-.333*	-.528**	-.207	-.143	-.215
	FuzzyEn	ML				.493**	.681**	.020	-.005	.018
		AP					.595**	-.048	-.007	-.023
		ER						.079	.052	.096
	ERROR	ML							.375*	.860**
		AP								.794**
		ERM								

*Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.05$.
 **Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.01$.
 ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio; ER = Error radial

4.2.6.4 Correlación entre los valores de regularidad y autocorrelación en la situación Sin Diana y el rendimiento obtenido en las situaciones Con diana y Con Recompensa.

Con el objetivo de analizar las posibles relaciones entre la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y el rendimiento obtenido en la tarea sin constreñir y la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y rendimiento obtenido en las tareas con un mayor nivel de constreñimiento (Con Diana y Con Recompensa), se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer la intensidad y el sentido de las relaciones.

En la tabla 20 se muestran los valores de correlación obtenidos al comparar las variables de autocorrelación y regularidad en la situación Sin Diana con las variables de autocorrelación y regularidad en las situaciones Con Diana y Con Recompensa. No se observan correlaciones entre las variables de autocorrelación y ninguna de las variables analizadas en las situaciones Con Diana y Con Recompensa. Asimismo, no se observan correlaciones entre la regularidad obtenida en las variables analizadas en la situación Sin Diana y ninguna de las variables analizadas en las situaciones Con Diana y Con Recompensa.

Tabla 20. Correlaciones entre la regularidad y la autocorrelación obtenidas en las series temporales de error en la tarea Sin Diana y el rendimiento obtenido en la tarea Con Diana y Con Recompensa.

		Con Diana			Con Recompensa			
		ML	AP	ER	ML	AP	ER	
Sin Diana	DFA	ML	.203	.102	.196	.138	-.091	.033
		AP	-.114	.229	.048	.007	-.088	-.045
		ER	.043	.111	.086	.024	-.109	-.045
	FuzzyEn	ML	-.190	-.107	-.189	-.037	.291	.141
		AP	-.033	-.151	-.105	.006	.203	.121
		ER	-.149	-.101	-.080	-.167	.050	-.076

*Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.05$.
 **Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.01$.
 ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial.

4.2.6.5 Correlación entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento en la situación Con Diana y la regularidad y rendimiento obtenido en la situación Con Diana y Con Recompensa.

Con el objetivo de analizar las posibles relaciones entre la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y rendimiento obtenido en la tarea constreñida a una diana y la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y rendimiento obtenido en las tareas con diana y con recompensa, se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer la intensidad y el sentido de las relaciones.

En la tabla 21 se muestran los valores de correlación obtenidos al comparar los resultados de las variables de autocorrelación, regularidad y rendimiento obtenidas en la

situación con diana, con las variables de autocorrelación, regularidad y rendimiento obtenidas en la situación con recompensa. Se observa una correlación positiva significativa entre los valores de autocorrelación en el eje ML de ambas situaciones ($r = .392$; $p = 0.001$). Esta misma variable en la situación con diana correlacionó negativamente con la regularidad obtenida en el eje ML de la situación con recompensa. No se observaron correlaciones entre ninguna de las variables de autocorrelación y el rendimiento. El resto de variables de autocorrelación no correlacionaron con ninguna de las variables analizadas.

Los valores de regularidad obtenidos en la situación con diana no correlacionaron con ninguna de las variables de autocorrelación analizadas en la situación con recompensa. Sin embargo, se obtuvieron correlaciones significativas positivas entre la regularidad en el eje ML en la situación con diana y la regularidad en ese mismo eje en situación con recompensa ($r = .300$; $p = 0.005$). Del mismo modo, la regularidad en el eje ML en situación con diana correlacionó positivamente con el error en el eje AP en situación con recompensa. Igualmente, la regularidad obtenida en el ER en la situación con diana correlacionó positivamente con la regularidad en el eje ML de la situación con recompensa ($r = .262$; $p = 0.005$).

Las variables de error en situación con diana únicamente correlacionaron en el eje AP ($r = .300$; $p = 0.005$) y el ERM ($r = .363$; $p = 0.001$) con el error en el eje ML de la situación con recompensa.

Tabla 21. Correlaciones entre la autocorrelación, regularidad y rendimiento en la tarea Con Diana y la autocorrelación, regularidad y rendimiento obtenido en la tarea Con Recompensa.

		Con Recompensa									
		DFA			FuzzyEn			ERROR			
		ML	AP	ER	ML	AP	ER	ML	AP	ERM	
Con Diana	DFA	ML	.392**	.132	.111	-.271*	-.061	-.096	-.061	-.175	-.130
		AP	.131	.223	.133	-.049	-.212	-.173	-.235	-.091	-.199
		ER	.181	.061	.153	-.284	-.096	-.144	-.072	-.164	-.136
	FuzzyEn	ML	-.039	.133	.085	.300*	.183	.190	.099	.273*	.218
		AP	-.115	.071	.014	.222	.148	.137	.169	.228	.235
		ER	-.075	-.102	-.009	.262*	.243	.225	.155	.163	.194
	Error	ML	-.130	.033	-.57	-.009	-.014	-.158	.246	-.039	.125
		AP	-.088	-.048	-.170	.147	.237	.212	.300*	-.037	.182
		ERM	-.127	-.017	-.125	.069	.121	.012	.363**	-.054	.202

*Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.05$.
 **Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.01$.
 ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio; ER = Error radial

4.2.6.6 Correlación entre los valores de regularidad y rendimiento en la situación Con Diana y la diferencia en el rendimiento entre las situaciones Con Diana y Con Recompensa.

Con el objetivo de analizar las posibles relaciones entre la complejidad mostrada por la estructura de la variabilidad y rendimiento obtenido en la tarea condicionada a una diana y la diferencia en el rendimiento entre las tareas con diana y con recompensa, se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer la intensidad y el sentido de las relaciones.

En la tabla 22 se muestran las correlaciones entre las variables de autocorrelación, regularidad y rendimiento con diana, y la diferencia de rendimiento obtenida entre las situaciones con diana y con recompensa en las variables de error. No se observan correlaciones entre las variables de autocorrelación de la situación con diana y las diferencias de rendimiento obtenidas entre las situaciones con diana y con recompensa. En el mismo sentido, no se muestran correlaciones entre las variables de regularidad de la situación con diana y las diferencias de rendimiento entre las situaciones con diana y con recompensa.

En las variables de error se observaron 7 de las 9 correlaciones posibles. Únicamente no correlacionaron entre sí las variables de error en el eje ML con el error en las diferencias

de rendimiento en el eje AP. Esto mismo se observó en el eje AP con la diferencias de rendimiento en el eje ML.

Tabla 22. Correlaciones entre regularidad y rendimiento Con Diana y las diferencias rendimiento entre las situaciones Con Diana y Con Recompensa.

		Rendimiento			
		ML	AP	ERM	
Con Diana	DFA	ML	.004	-.195	-.117
		AP	-.164	.093	-.044
		ER	.104	-.053	.030
	FuzzyEn	ML	.182	.156	.217
		AP	.165	.060	.150
		ER	.097	.071	.118
	Error	ML	-.679**	-.199	-.565**
		AP	.023	-.756**	-.480**
		ERM	-.425**	-.590**	-.662**

*Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.05$.

**Correlación bivariada de Pearson significativa a $p < 0.01$.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ERM = Error radial medio; ER = Error radial



5 DISCUSIÓN

La variabilidad del movimiento humano ha sido uno de los tópicos principales en la disciplina de Control Motor, generando gran cantidad de trabajos en las últimas décadas que han tratado de explicar su rol en el control del movimiento. La variabilidad ha sido abordada desde diferentes perspectivas y visiones que la han situado en polos aparentemente opuestos, pasando de ser considerada como un factor limitante (Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank y Quinn Jr, 1979) a revelarse como una condición necesaria para la funcionalidad de un sistema (Davids y col., 2003; Riley y Turvey, 2002). La incorporación de la teoría de los sistemas dinámicos complejos al estudio del control del movimiento humano, estimuló la aplicación de nuevas herramientas de análisis que han permitido conocer características de las dinámicas temporales de la variabilidad, así como las características de su estructura a través del análisis de su complejidad (Stergiou y col., 2006).

Para alcanzar uno de los objetivos propuestos en esta tesis doctoral se analizaron las características de la variabilidad durante la realización de una tarea cíclica de punteo y cómo el efecto de las condiciones de la tarea (sin diana, con diana o con recompensa) podría modificar las dinámicas temporales de la variabilidad y su estructura. Para ello, los resultados del error obtenido en las tareas de punteo fueron analizados mediante la utilización de diferentes herramientas. Se utilizaron las herramientas lineales como la media aritmética para analizar la magnitud del cambio respecto al punto criterio producido con la introducción de las diferentes condiciones de la tarea; y la desviación típica, que analiza el grado de dispersión de los datos mostrado respecto a un valor medio por los participantes en cada una de las condiciones a las que fueron sometidos. Las series temporales de error y tiempo de movimiento fueron analizadas mediante herramientas de análisis no lineal para analizar el efecto de las condiciones de la tarea sobre las dinámicas no lineales de la

variabilidad motora y su evolución temporal, tratando de alcanzar otro de los objetivos propuestos en esta tesis.

Las herramientas no lineales seleccionadas para nuestro estudio fueron FuzzyEn y DFA, tal y como previamente fueron descritas en la introducción. Estas herramientas fueron testeadas en trabajos previos realizados en nuestro grupo de investigación, obteniendo una buena consistencia y fiabilidad de los resultados (Caballero y col., 2014). Las herramientas utilizadas permiten evaluar la regularidad (FuzzyEn) y la autocorrelación (DFA) de las series temporales, ofreciendo información sobre las características de su estructura, evolución temporal y complejidad (Fino y col., 2014; Borg y Laxåback, 2010; Duarte y Sternad, 2008; Harbourne y Stergiou, 2009). Estas técnicas han permitido a los investigadores revelar la complejidad de la estructura de la variabilidad del movimiento así como su dimensión fractal (Delignières y Marmelat, 2013; Gilden, 2001; Ihlen, 2012). Desde la perspectiva del análisis de la dimensión fractal, el tipo de estructura $1/f$ en la variabilidad de las series temporales de datos ha sido habitualmente referido como ruido rosa. En la literatura se recogen términos específicos para determinados valores de autocorrelación, siendo éstos asociados a valores cercanos a un $\alpha = 0.5$ cuando es una señal no correlacionada con un comportamiento aleatorio, identificada también como distribución de ruido blanco. Cuando los valores de α están próximos a 1 es una señal correlacionada con un comportamiento entre aleatorio y determinista relacionado con una estructura de ruido rosa, mientras que valores de $\alpha = 1.5$ son considerados como un comportamiento más regular y determinístico, próximo a una estructura aleatoria identificada como ruido marrón.

Los cambios obtenidos en la estructura de la variabilidad del movimiento humano, han sido interpretados por algunos autores como cambios en los procesos de auto-organización en la relación del sistema con su entorno, relacionados con comportamientos exploratorios, distintos niveles de rendimiento en las tareas, cambios en la voluntariedad de las acciones o un cambio en la implicación durante la realización de una tarea (Borg y Laxåback, 2010;

Chen y col., 2001; Delignières y Torre, 2009; Roerdink y col., 2006; Stins, Michielsen, Roerdink y Beek, 2009). Por ejemplo Stins y col. (2009) analizaron el control postural en bailarines y no bailarines, a los que pedían mantener la posición firme durante 20 segundos con los ojos abiertos, ojos cerrados y realizando estas mismas situaciones memorizando una serie de palabras presentadas (*dual task*). En este estudio se analizó la estructura dinámica de la trayectoria del CoP mediante SampEn, concluyendo que una menor entropía es equivalente a una mayor atención durante la realización de la tarea, provocando una señal más regular y por tanto menos compleja, y mientras que una alta entropía indicaría un menor requerimiento o implicación de atención durante la ejecución.

En los siguientes apartados se tratará de discutir los resultados obtenidos en el rendimiento en función de las condiciones en las que se realizaron las tareas, así como el efecto provocado sobre las dinámicas de la estructura de la variabilidad, analizadas mediante la regularidad y autocorrelación de las series temporales de error y tiempo de movimiento. Los resultados obtenidos en las relaciones entre el rendimiento y las modificaciones en la estructura de la variabilidad producidas por las condiciones de ejecución de la tarea serán discutidos para tratar de clarificar la dirección de los resultados y explicar así su significado. Para finalizar, se discutirán los efectos provocados sobre el rendimiento y la estructura de la variabilidad en la tarea con recompensa, cuando se manipula su evolución el tiempo.

5.1 RENDIMIENTO OBTENIDO EN LAS VARIABLES DE ERROR EN LAS TAREAS DE PUNTEO.

En la tarea sin diana se calcularon los promedios y desviaciones típicas de las posiciones de la punta del estilete en el momento de impactar con la superficie utilizada en el test. Se consideró el punto de inicio como referencia para calcular los valores de error en cada uno de los ejes y el error radial. Estos resultados fueron considerados medida basal de dispersión y analizados mediante las herramientas lineales y no lineales planteadas en

el estudio. A partir de los resultados obtenidos en la tarea sin diana, se observaron las modificaciones mostradas en las variables de error cuando los participantes tenían que ajustarse a una diana, así como con la introducción de la recompensa. Los resultados contrastan nuestra hipótesis inicial sobre cómo la descripción de las características de la variabilidad motora, durante la realización de una tarea cíclica de punteo, permitirán determinar la magnitud de los cambios producidos en las variables de rendimiento en función de las condiciones de ejecución de la tarea.

Los resultados obtenidos en las variables de rendimiento mostraron una mejora evidente cuando realizaron la tarea con diana, confirmando otra de las hipótesis de nuestro estudio. Era de esperar la existencia de diferencias significativas entre los resultados de la tarea sin diana y la tarea con diana. La realización de la tarea con recompensa provocó una disminución de los resultados de error en todas las variables respecto a los resultados obtenidos en las tareas con y sin diana. En términos relativos, la tarea con recompensa obtuvo una mejora en el rendimiento del 18% en el eje medio lateral, un 6% en el eje anteroposterior y un 16% en el error radial respecto a los resultados obtenidos en la tarea con diana sin recompensa. Los resultados obtenidos en la tarea con recompensa respecto a la tarea con diana se observan especialmente en el eje mediolateral. Esta mejora de rendimiento parece ser debida a un mayor ajuste en este eje, siendo en esta situación el principal componente que afecta al error en esta tarea. Esta mejora en el resultado podría ser asociada a que la recompensa provocó un mayor esfuerzo por parte de los participantes para ajustarse durante la fase de frenado con el objetivo de tratar de impactar en la diana. El análisis por ventanas de las variables de error mostró un incremento del error en todos los test a medida que avanzaba la prueba, aspecto que podría reflejar aspectos relacionados con la fatiga, el aburrimiento o la pérdida de atención al realizar una tarea considerada muy sencilla y que era repetida durante todas las condiciones a que eran sometidos los participantes. Resultados contradictorios fueron presentados por Gates y

Dingwell (2008) en el que comparaban los efectos de la fatiga sobre el rendimiento obtenido en una tarea repetitiva dirigida hacia una diana, y observaron que la fatiga inducida no afectó de manera significativa al rendimiento en la tarea. Otra de las posibles explicaciones de la pérdida de rendimiento vendría originada por el efecto de la fatiga psicológica que los participantes podrían experimentar al estar sometidos durante largos periodos a una actividad cognitiva, provocándoles pérdidas de atención durante el desarrollo de la tarea (Boksem, Meijman y Lorist, 2005).

En la tarea sin diana, los valores de variabilidad fueron mayores que el resto de tareas, reduciéndose ésta en las tareas con diana y con recompensa. La variabilidad obtenida en la tarea con diana, al igual que ocurriera con el error, se vio reducida de forma significativa en todas las variables cuando la tarea fue realizada con recompensa, lo que indica que los participantes trataban de ajustar más su precisión en cada ensayo y por tanto disminuían sus oscilaciones. Este aspecto ha sido considerado muy importante en los resultados de la tesis doctoral, puesto que uno de los postulados sobre los que se asienta es que con la modificación de las condiciones de la tarea se tiene el objetivo de conseguir una mayor implicación o intención por parte del participante en la ejecución.

Desde nuestro punto de vista, esta intención o implicación no es sino someter al participante a un condicionante como puede ser una diana y que efectivamente actúe como tal, condicionando su comportamiento, que en este caso sería ajustarse a la diana.

Los resultados del análisis correlacional mostraron relaciones entre el ERM en la tarea con diana y el error obtenido en el eje ML en la tarea con recompensa, obteniendo una correlación leve ($r = .363$; $p < 0.05$). El error en el eje ML en la tarea con recompensa correlacionó significativamente con el error en el eje AP en esa misma tarea ($r = .375$; $p < 0.05$), aunque como en el caso anterior la correlación fue igualmente leve. El resto de correlaciones encontradas se dieron dentro de cada una de las tareas, encontrándose correlaciones en las tres condiciones de ejecución entre los errores de los ejes ML, AP, y

el ERM. Estas correlaciones dentro de la misma tarea eran de esperar, debido a que el ERM es calculado mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de ambos errores, por lo que el ERM es dependiente de ambas variables. La ausencia de correlación de las variables de rendimiento entre las diferentes tareas podría ser un indicativo de la influencia del constreñimiento, provocando un efecto distinto en función del esfuerzo que ha supuesto para el participante ajustarse a la diana, que podría verse reflejado en una menor o mayor mejora del rendimiento. Igualmente, la realización de una tarea sencilla como la llevada a cabo en nuestro experimento podría no ser suficiente estímulo como para discriminar niveles de rendimiento en los participantes, originándose una distribución más aleatoria en cada tarea. Por ejemplo, los participantes que obtuvieron mayor rendimiento en la tarea sin diana no tienen por qué ser los que obtuvieron mayor rendimiento en las tareas con diana o con recompensa y viceversa, viéndose afectados de forma diferente por las condiciones de ejecución.

Comprobada la mejora de rendimiento obtenida cuando la tarea era realizada con recompensa, y con el objetivo de tratar de identificar si la manipulación de la reducción de la recompensa podría provocar un esfuerzo adicional sobre los participantes, éstos fueron divididos en tres subniveles de la tarea con recompensa que se corresponden con la manipulación en base a la reducción de la cuantía en los niveles (Alto 1, Alto 2, Alto 3), representando un descenso de los niveles de constreñimiento de la tarea de mayor a menor tal y como ha sido descrito en el método de esta tesis doctoral. Nuestra hipótesis inicial planteaba que los grupos se ordenarían de forma que a mayor recompensa obtenida, mayores niveles de rendimiento mostrarían en la tarea. Sin embargo, esta hipótesis no se cumplió, no encontrándose diferencias entre el rendimiento obtenido por cada uno de los grupos en función de los tres niveles de reducción de la recompensa.

Con el objetivo de identificar los efectos de la reducción de la recompensa provocados sobre los participantes de cada uno de los grupos, los resultados en el rendimiento fueron

calculados cada minuto, coincidiendo con el momento en que era presentada la información a los participantes. Al igual que ocurriera con el rendimiento total, no se encontraron diferencias entre los grupos en la comparación del rendimiento obtenido cada minuto. Estos resultados podrían ser un indicativo de que el nivel de constreñimiento de la tarea con recompensa ya era suficientemente elevado como para provocar en los participantes un nivel de esfuerzo adicional para ajustarse a la diana. Por tanto, la manipulación de la recompensa no produjo cambios sobre el rendimiento, posiblemente por la imposibilidad de realizar más ajustes debido a las características intrínsecas de la propia tarea o por la redundancia de la misma, que podría provocar pérdidas de concentración durante la ejecución.

5.2 REGULARIDAD DE LAS VARIABLES DE ERROR Y TIEMPO DE MOVIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA TAREA.

Como previamente fue planteado en la introducción, la regularidad de las series temporales del error y tiempo de movimiento fueron analizados mediante un análisis de entropía en el que se utilizaron las herramientas ApEn, SampEn y FuzzyEn. Dadas las referencias obtenidas en varios de los trabajos de nuestro grupo de investigación (Caballero y col., 2015), se decidió utilizar los valores de FuzzyEn para analizar la regularidad de la señal, si bien los resultados obtenidos en el análisis realizado mediante ApEn y SampEn se obtienen resultados similares y son presentados en los anexos. La utilización de esta herramienta de análisis no lineal nos ha permitido analizar la estructura de la variabilidad de las series temporales de error y TM, así como observar su evolución temporal, describiendo los efectos provocados sobre la regularidad de las series temporales analizadas por la manipulación de los condicionantes de la tarea, contrastando así otra de nuestras hipótesis.

La regularidad o irregularidad de las series temporales ha sido asociada por numerosos autores como un signo de voluntariedad o intencionalidad durante la ejecución

de la tarea (Borg y Laxåback, 2010; Donker y col., 2007; Haran y Keshner, 2008; Roerdink y col., 2011a). Los resultados obtenidos sobre las características de la variabilidad apoyan la hipótesis de partida, permitiendo determinar la intencionalidad de los participantes y cómo ésta se ve afectada por las condiciones de la tarea.

La comparación entre los valores de entropía de todas las tareas mostró una mayor regularidad en la tarea sin diana, mostrando una menor complejidad respecto a las tareas con diana y con recompensa. La realización de la tarea ajustándose a una diana o con recompensa provocó una mayor irregularidad en los valores de las series temporales de error, confirmando que el grado de comportamiento constreñido supone ajustes alrededor del objetivo provocando así un comportamiento menos regular. Borg y Laxåback (2010) interpretaban el decrecimiento de la entropía como un signo de mayor atención dedicado a la tarea, provocando una mayor regularidad de las series temporales.

Las tareas con diana y con recompensa mostraron una mayor irregularidad de las series temporales de error comparados con la situación sin diana. Esta mayor irregularidad vendría ocasionada por la necesidad de realizar ajustes para corregir el error observado en cada ensayo e impactar sobre la diana, provocando una pérdida de la regularidad de las series temporales de error. El incremento de los valores observados en la irregularidad de las series temporales de error entre la tarea con diana y con recompensa, indicarían una mayor cantidad de correcciones realizadas por los participantes con el objetivo de ajustarse mejor a la diana y mantener la cuantía de recompensa en la tarea, finalmente traducido en un incremento de la entropía y con ello de la complejidad.

No obstante, la reducción de entropía o de la complejidad han sido interpretada por algunos autores como un signo de mayor atención dedicada a la tarea (Borg y Laxåback, 2010; Cavanaugh y col., 2007; Donker y col., 2007; Roerdink y col., 2006; Roerdink y col., 2011a; Stins y col., 2009). En nuestro estudio, los resultados con menor entropía fueron los obtenidos en la tarea sin diana, donde el participante no tenía que ajustarse a ningún

parámetro de precisión. Estos resultados son interpretados desde el paradigma de aumento o disminución de la intencionalidad, considerando que en la tarea sin diana los resultados obtenidos en los que se observan menores valores de entropía implicarían un control voluntario adicional por parte del participante para llevar a cabo la tarea (Van Orden, 2010), mientras que la presencia de un control externo como en nuestra tarea sería una diana o una recompensa, provocaría una reducción del control voluntario, siendo el feedback de precisión en nuestro caso el observado por los participantes como resultado de su propia ejecución considerado como una forma de control voluntario (Delignières y Torre, 2009). Estos conceptos recogidos en la literatura como intencionalidad, voluntariedad, implicación o atención, podrían llevar a confusión, debido especialmente a las interpretaciones realizadas por algunos autores (Borg y Laxåback, 2010; Chen y col., 2001; Delignières y Torre, 2009; Kloos y Van Orden, 2010; Kuznetsov y Wallot, 2011; Van Orden, 2010; Van Orden y col., 2011; Washburn y col., 2013) sobre la reducción de la voluntariedad en tareas que son constreñidas por una diana o un estímulo sonoro, o la consideración de control voluntario cuando la tarea no está constreñida. Estas interpretaciones no permiten explicar algunas posibles cuestiones como por ejemplo: ¿Qué ocurre cuando la existencia de una diana o un estímulo sonoro están presentes, pero el participante no se ajusta a la diana y lo hace igual que en una tarea sin constreñir?; ¿La intención de ajustarse a la diana es un acto involuntario?; ¿Y si a pesar de no estar constreñida la tarea el participante utiliza un criterio espacial propio para ajustarse a una zona determinada? Estas y otras preguntas tratamos de abordarlas en esta tesis doctoral desde la perspectiva de los constreñimientos, y cómo distintas condiciones de la tarea efectivamente constriñen la ejecución y con ello los resultados.

Nuestra posición al respecto se centra en afrontar los conceptos utilizados en la literatura, tratando de orientar la interpretación de los resultados en cómo se comporta un

sistema cuando es sometido a un constreñimiento y el efecto que provoca la disminución o aumento del nivel de ese constreñimiento.

Durante la realización de cada una de las tareas, la posición de la mano durante la ejecución no estuvo constreñida por ningún parámetro externo, por lo que las modificaciones obtenidas en la regularidad de las series temporales de los ángulos son consideradas como una forma de auto-organización del sistema para ajustarse a las condiciones de la tarea, observándose valores muy regulares en todas las condiciones de ejecución. Los valores obtenidos en la autocorrelación de las series temporales refuerzan esta perspectiva, tal y como se presenta en el siguiente apartado.

5.3 AUTOCORRELACIÓN DE LAS VARIABLES DE ERROR Y TIEMPO DE MOVIMIENTO EN LAS TAREAS DE PUNTEO.

La estructura de la variabilidad fue analizada mediante la herramienta DFA, con la que se ha realizado una valoración de la auto correlación de las series temporales del error, las características de la ejecución y el tiempo de movimiento en todas las tareas, cumpliendo así un objetivo de esta tesis doctoral al analizar el efecto de las condiciones de la tarea sobre las dinámicas no lineales de la variabilidad motora. Los resultados obtenidos con la utilización de esta herramienta de análisis no lineal, apoyan nuestra hipótesis inicial permitiéndonos describir la estructura de la variabilidad motora, su evolución temporal y los efectos de las condiciones en que se realiza la tarea sobre la estructura de la variabilidad. La comparación entre las tareas realizadas en este estudio mostró resultados más auto correlacionados con valores de α cercanos a 1, relacionado con la estructura 1/f o ruido rosa, en la tarea sin diana en todas las variables de error. Estos resultados están en la línea de otros trabajos que analizaron la estructura de la variabilidad durante la realización de una situación experimental sin utilizar criterio de ajuste externo (Li y col., 2015; Torre y Delignieres, 2008). La no existencia de un criterio externo que condicione las respuestas de los participantes conlleva que éstos se auto-organicen libremente para completar la tarea

Por el contrario, al introducir un condicionante externo como una diana, los valores fueron menos autocorrelacionados, desplazándose de forma significativa hacia valores de α próximos a 0.5 e identificado con la estructura del ruido blanco. El tiempo de movimiento estuvo marcado mediante la utilización de un metrónomo manteniendo constante la frecuencia de ejecución, mostrando también valores de autocorrelación próximos a ruido blanco, que se mantuvieron estables independientemente de la introducción de una diana o recompensa. Resultados similares en la estructura de la variabilidad han sido presentados cuando los participantes recibían feedback, observándose un desplazamiento hacia una señal no correlacionada similar a ruido blanco (Chen y col., 2001; Delignieres y col., 2004; Gilden, Thornton y Mallon, 1995; Kuznetsov y Wallot, 2011; Lemoine y col., 2006; Romero y col., 2013).

Algunos autores argumentan que la manipulación de las condiciones de la tarea ha mostrado una influencia relativa en la cantidad de control voluntario o involuntario empleado para completar una tarea. Bajo este paradigma, algunos autores han considerado la realización de la tarea sin feedback o ajuste externo como una expresión del movimiento de manera voluntaria, auto-organizada e intencional para realizar la tarea, mientras que la introducción de un constreñimiento externo como podría ser una diana reduciría la voluntariedad del participante al condicionar la tarea a un punto criterio (Van Orden, 2010; Washburn y col., 2013). Esta consideración de voluntariedad o involuntariedad es un concepto subjetivo y puede ser interpretada de diversas maneras. Desde nuestro punto de vista, la introducción de una diana induciría la manifestación de procesos de control del movimiento, tratando de ajustarse a la marca ofrecida al ejecutante. De cualquier modo, donde existe unanimidad entre los trabajos previos es que el nivel de constreñimiento impuesto por la configuración experimental de la tarea actúa como predictivo de la estructura de la variabilidad mostrada. Unas condiciones de la tarea que la constriñeran en gran manera resultaría en valores próximos o iguales a ruido blanco y muy leve, o la

ausencia de constreñimiento tendería hacia valores próximos o cercanos a ruido rosa (Chen y col., 2001; Delignières y Torre, 2009; Hausdorff y col., 1997). Estudios previos han demostrado que proporcionar un estímulo externo como un metrónomo o una diana mientras los participantes son requeridos para mantener un patrón de movimiento, producen una reducción del control voluntario, resultando en variaciones aleatorias en el rendimiento caracterizadas por un ruido blanco (Chen y col., 2001).

Una estructura de la variabilidad próxima a ruido rosa ha sido asociada a signos de funcionabilidad saludable en numerosas tareas de la vida diaria (Delignieres y col., 2008; Hausdorff, 2007; Holden y col., 2011; Kello y col., 2007; Schmit y col., 2005; Schmit y col., 2006; Torre y col., 2010; Van Orden y col., 2011). Consistente con esta interpretación, durante la realización de tareas sencillas, la presencia de un *output* en el comportamiento con una estructura de ruido rosa es una característica de comportamientos funcionales, mientras que el ruido blanco se observa cuando la dificultad de la tarea aumenta, siendo ésta la situación que se observa al introducir feedback externo. Por otro lado, la incapacidad de ajustarse por parte de un sujeto a un criterio como podría ser la presencia de un ritmo ofrecido por un metrónomo o una diana, sería le llevaría a mantener invariable su estructura, en este caso, próxima a ruido rosa, lo cual también se podría relacionar con una pérdida de la capacidad funcional o de la capacidad de adaptación.

La introducción de la condición con recompensa implicaba un mayor requerimiento en el ajuste a una diana (feedback de resultado), provocando disminuciones de los valores de autocorrelación prácticamente en todas las variables de error, siendo éstas significativas en el eje anteroposterior. Habría que destacar que los resultados obtenidos en este eje en la situación sin recompensa mostraron los valores de α más alejados de 0.5, lo que conferiría un mayor margen para disminuir sus valores hacia $\alpha = 0.5$ con el objetivo de ajustarse a la diana. Los resultados obtenidos en la tarea con recompensa donde todos los valores de α se encuentran próximos a 0.5, y podrían ser tomados como un criterio de mayor implicación

en la tarea motivado por la realización de la ejecución de la tarea con recompensa. En términos generales, se muestran menores valores de autocorrelación cuando además de ajustarse a una diana se introduce la condición con recompensa. Los resultados encontrados, tanto en el rendimiento como en los valores de autocorrelación, tienen la misma tendencia, observándose una mejora del rendimiento en términos de error y a la vez una menor autocorrelación de la señal. Sin embargo, no se observaron correlaciones significativas entre los valores de autocorrelación y el error en la tarea con recompensa en ninguna de las variables analizadas. Para interpretar los resultados de autocorrelación hay que tener en cuenta los valores de error obtenidos en la tarea con recompensa, donde al contrario que en la autocorrelación, no hubo significación entre los valores de error en el eje AP de las tareas con diana y con recompensa, siendo este último el eje que menores valores de error mostró. Esta mejora en el rendimiento en el eje AP se observa igualmente en una reducción de los valores de autocorrelación, que corresponden a los continuos ajustes de los participantes para tratar de impactar en la diana.

En una de nuestras hipótesis iniciales se planteaba la modificación de la estructura de la variabilidad por efecto de los constreñimientos de la ejecución de la tarea. Esta hipótesis fue confirmada en la comparación de los valores de autocorrelación obtenidos en cada una de las tareas que fueron realizadas ajustándose a diferentes niveles de constreñimiento. Corroborada esta hipótesis, se planteó la pregunta de si los resultados obtenidos en la autocorrelación se mantendrían estables durante la realización de la tarea. Para ello, se realizó un análisis por ventanas con el objetivo de tratar de identificar posibles cambios en los valores de autocorrelación durante la ejecución y observar la evolución de éstos en las series temporales de error y de tiempo de movimiento. Estos resultados muestran de forma dinámica la evolución temporal de los valores de autocorrelación en tres momentos puntuales de la ejecución de la tarea, obtenidos tras el análisis por ventanas solapadas de toda la serie temporal y promediada en las fases inicial, intermedia y final. En la tarea sin

diana, los valores de autocorrelación se mantienen estables durante la realización de la tarea excepto en el eje AP donde incrementan los valores de autocorrelación conforme transcurre el tiempo de los ensayos. Esta misma situación ocurre en la tarea con diana, donde al igual que en la situación sin diana, se observa un incremento significativo de los valores de autocorrelación en el mismo eje. A diferencia de las tareas sin diana y con diana, la realización de la tarea con recompensa no mostró diferencias significativas en las variables de error o TM. El efecto de la fatiga muscular sobre los valores de autocorrelación de las series temporales de los tiempos de movimiento, fue una variable de estudio por Gates y Dingwell (2008), concluyendo que la fatiga provocaba un descenso de los valores de autocorrelación. Estos descensos en los valores de autocorrelación son similares a los presentados por Corbeil, Blouin, Bégin, Nougier y Teasdale (2003), que evaluaron la estabilidad postural en la tarea en condiciones con y sin visión, induciendo fatiga muscular en ambas piernas, mostrando valores menos autocorrelacionados cuando la fatiga estaba presente. A la vista de los resultados observados en la literatura y los resultados obtenidos en nuestro estudio, el incremento en los valores de α a medida que avanza la tarea, supone un nuevo distanciamiento de 0.5, lo cual supone una menor incidencia del constreñimiento. En nuestro caso no aparece un descenso en la autocorrelación por el supuesto efecto de la fatiga. Esto puede deberse bien a que en la tarea no se produjo fatiga, algo poco probable, o que el incremento de la fatiga estuviera aparejado a una disminución de la atención y con ello el constreñimiento de ajustarse a la diana disminuiría. Dado que no disponemos de datos sobre la fatiga acumulada localmente, esta cuestión debería abordarse de forma más específica en futuros estudios.

El análisis de los valores de autocorrelación en las series temporales de los ángulos azimut, elevación y rotación, mostraron valores cercanos a ruido rosa ($\alpha = 1$) en todas las tareas. Esto podría ser debido a que los participantes, independientemente de la existencia de diferentes condiciones de la tarea, utilizaban estrategias similares durante el momento

de punteo, no viéndose afectados los ángulos por la introducción de un condicionante externo y por tanto, mostrando valores similares en todas las tareas. Estos resultados, al igual que en las variables de error, son interpretados desde dos puntos de vista. Por un lado, los ángulos no fueron sometidos a ninguna condición externa, obteniendo valores más autocorrelacionados en todas las tareas. Estos resultados son similares a los presentados por otros estudios en los que la ausencia de constreñimientos tendería hacia valores próximos o cercanos a ruido rosa (Li y col., 2015; Torre y Delignieres, 2008). Por otro lado, la ausencia de un condicionante que afecte a las características del movimiento implicaría una mayor intencionalidad o voluntariedad para realizar la tarea y consecuentemente tendería hacia valores próximos o cercanos a ruido rosa (Chen, Ding y Kelso, 2001; Delignières y Torre, 2009; Hausdorff y col., 1997). Tal y como se presentó en la introducción, los conceptos de intencionalidad o voluntariedad siguen actualmente siendo tema de debate por la comunidad científica, y dependiendo de la interpretación podría ser considerado el ajustarse a una diana o criterio como un acto voluntario o intencionado.

Siguiendo la tendencia observada en el rendimiento y la regularidad de las series temporales obtenidos por cada uno de los grupos en función de los niveles de manipulación de la recompensa, los valores de autocorrelación no mostraron diferencias entre los grupos. Los resultados en los valores de autocorrelación en los tres niveles de manipulación de la recompensa mostraron cómo el comportamiento constreñido en esta tarea fue un estímulo suficientemente elevado para provocar un nivel de esfuerzo elevado por los participantes, aproximando todos los valores a un no correlacionado ruido blanco. Por tanto, incrementos en el nivel de constreñimiento en esta tarea al manipular la reducción de la recompensa no provocó modificaciones en los valores de autocorrelación debido posiblemente a la imposibilidad de realizar más ajustes. Estos valores menos autocorrelacionados cercanos a ruido blanco podrían indicar la ausencia de margen para disminuir sus valores y modificar

su comportamiento, correspondiendo con la incapacidad de alterar sus valores de autocorrelación por el efecto de un mayor nivel de constreñimiento.

5.4 *RELACIÓN ENTRE COMPLEJIDAD Y RENDIMIENTO.*

La relación entre la complejidad del movimiento y el rendimiento motor ha suscitado numerosos trabajos en los últimos años que han mostrado esta relación durante la realización de diferentes tareas. Las tareas de control postural han sido especialmente una de las principales fuentes de estudio, encontrándose resultados que soportan esta relación. Algunos trabajos sugieren que una menor complejidad en las dinámicas del CoP estaría asociada con un peor rendimiento (Borg y Laxåback, 2010; Donker y col., 2007; Stins y col., 2009). Sin embargo, en la literatura se encuentran igualmente estudios en tareas de estabilidad postural que contradicen estos resultados, encontrando mayor complejidad en la dinámica del CoP y una pérdida de rendimiento al comparar jóvenes frente a ancianos (Duarte y Sternad, 2008; Roerdink y col., 2011a; Vaillancourt y Newell, 2002).

Una de las hipótesis planteadas en esta tesis doctoral sostenía que el rendimiento en una tarea cíclica de punteo estaría relacionado con la estructura de la variabilidad mostrada, de forma que un mayor rendimiento en la tarea conllevará una estructura de la variabilidad del resultado más irregular y menos autocorrelacionada. En nuestro estudio se utilizó una tarea cíclica de punteo que era modificada introduciendo una diana y realizando la tarea con una recompensa económica, para tratar de identificar la posible existencia de una relación entre la complejidad observada en la estructura de la variabilidad en función de la tarea y el resultado obtenido en términos de rendimiento o aprendizaje. Esta relación entre complejidad y rendimiento ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, utilizando diferentes procedimientos y herramientas de análisis durante la realización de diversas tareas (Barbado y col., 2012; Borg y Laxåback, 2010; Deffeyes y col., 2009; Donker y col., 2007; Haran y Keshner, 2008; Roerdink y col., 2006; Romero y col., 2013). No obstante, la

relación entre complejidad y rendimiento parece en la actualidad ser poco clara y sigue siendo cuestión de debate en numerosos foros científicos.

Para tratar de identificar esta posible relación entre la complejidad mostrada por los participantes y el rendimiento obtenido en cada una de las tareas de punteo realizadas en función de la presencia o ausencia de una diana o de una recompensa, se realizó el análisis correlacional para evaluar si alguna variable podría explicar la influencia sobre el rendimiento en las tareas.

Al analizar las relaciones de autocorrelación, regularidad y rendimiento en la tarea sin diana, se observaron correlaciones positivas entre la autocorrelación en los ejes ML y AP con su mismo eje en el rendimiento, de tal forma que en la tarea sin ajuste espacial valores elevados de autocorrelación en un eje determinado, se asocia a una elevada dispersión en el rendimiento en su mismo eje. Los valores de autocorrelación de las series temporales del ER tienen la misma dirección, correlacionando positivamente con todas las variables de rendimiento. Estos resultados confirman un comportamiento alejado de constreñimientos que se auto-organiza para realizar la tarea.

Los resultados correlacionales obtenidos en la tarea sin diana entre las variables de autocorrelación y las variables de regularidad de las series temporales utilizadas en nuestro estudio mostraron una relación inversa, lo que indicaría que elevados valores de autocorrelación mostrarían una mayor regularidad de las series temporales. Estos resultados están en consonancia con los presentados por Borg y Laxåback (2010) al analizar la estabilidad postural en dos grupos de edad (jóvenes y ancianos) utilizando como herramientas de análisis SampEn y DFA, en la que valores más autocorrelacionados mostraban una mayor regularidad de los resultados. Donker y col. (2007), en una tarea de control postural, obtuvieron resultados similares al analizar el control postural en las tareas con ojos cerrados y ojos abiertos, mostrando que elevados valores de autocorrelación son igualmente relacionados con una mayor regularidad de las series temporales.

Al igual que en la tarea sin diana, las relaciones inversas obtenidas entre los valores de autocorrelación y regularidad se observan en las tareas con diana y con recompensa, lo que indicaría la estabilidad de los resultados obtenidos independientemente de las condiciones de la tarea. La introducción de un condicionante en la tarea provocó una pérdida de la relación entre complejidad y rendimiento encontrada en la tarea sin diana. Contrariamente a las relaciones encontradas entre los valores de autocorrelación y el rendimiento, la realización de la tarea ajustándose a una diana no mostró relación alguna entre ninguna de las variables analizadas. Estos mismos resultados se repiten en la tarea con recompensa, no encontrándose relación alguna entre los valores de autocorrelación o regularidad con el rendimiento en esta tarea.

El análisis de correlación entre los resultados de la regularidad de las series temporales en la tarea sin diana y el rendimiento, mostraron una relación inversa, lo que indicaría que una mayor regularidad en sus valores se relaciona con un menor rendimiento en la tarea.

Para comprobar si la relación entre complejidad y rendimiento observada en la tarea sin constreñir pudiera ser predictiva del rendimiento en tareas sometidas a un nivel de constreñimiento (con diana o con recompensa), se realizó un análisis de correlación entre las variables de autocorrelación y regularidad de la tarea sin diana y el rendimiento en las tareas con diana y con recompensa, no encontrándose relación entre ninguna de las variables analizadas. Este mismo análisis correlacional fue realizado comparando las variables de regularidad, autocorrelación y rendimiento en la tarea con diana y las mismas variables en la tarea con recompensa, obteniéndose idénticos resultados.

La ausencia de relaciones claras entre los valores de regularidad, autocorrelación y rendimiento en las tareas con diana y con recompensa condujeron al siguiente análisis: identificar las posibles relaciones entre los valores de las variables de autocorrelación, regularidad y rendimiento en la tarea con diana y la mejora obtenida en el rendimiento en

la tarea con recompensa. No se encontró relación entre las variables de autocorrelación y regularidad con la mejora del rendimiento. No obstante, sí se encontraron relaciones inversas en las variables de rendimiento en los ejes ML y AP que correlacionaron negativamente con su mismo eje con las diferencias de rendimiento. El análisis correlacional mostró igualmente una relación inversa entre el ERM de la tarea con diana y la mejora del rendimiento en los ejes ML, AP y el ERM entre las tareas con diana y con recompensa. Estas relaciones negativas observadas en las variables de error indicarían la influencia provocada por el nivel más alto de constreñimiento, reduciendo el error cuando la tarea era realizada con recompensa.

En el estudio realizado por Caballero, Barbado y Moreno (en revisión) en tareas de equilibrio sobre plataformas inestables de diferentes niveles de dificultad, realizada con y sin feedback de precisión, se obtuvieron relaciones entre la complejidad y el rendimiento en las tareas realizadas sin feedback, donde los participantes con mayor rendimiento obtenían una mayor complejidad (menor DFA y menor FuzzyEn). Resultados similares son presentados por Li y col. (2015) en una tarea realizada con y sin feedback, obteniendo mayores valores de autocorrelación cuando los participantes no recibían feedback durante la ejecución de la tarea, que a su vez se relacionaba con una pérdida de rendimiento.

En la tarea sin diana, los participantes no tenían que ajustarse a ningún parámetro de precisión, mostrando un comportamiento exploratorio y por tanto menos complejo que se relacionaba con la cantidad de dispersión mostrada. Los resultados de nuestro estudio durante la realización de la tarea sin diana mostraron mayor regularidad o baja complejidad, mostrando una relación con la cantidad de dispersión de los participantes durante su ejecución.

Esta ausencia de relación entre la complejidad y el rendimiento en las tareas con diana podría ser debida a la influencia sobre los participantes de las características propias de la tarea, que habrían provocado un mayor o menor esfuerzo para tratar de ajustarse a la diana.

Discusión

Vaillancourt y Newell (2002) sostenían que descensos o incrementos en la complejidad de un sistema son dependientes de las dinámicas intrínsecas de un sistema y de las condiciones de la tarea.



6 CONCLUSIONES.

A continuación se presentan las principales conclusiones de este estudio, representando las aportaciones más importantes de esta Tesis Doctoral en base a las hipótesis definidas en nuestra investigación. Para ello, se aceptarán o rechazaran cada una de las hipótesis a partir de los resultados obtenidos que dan lugar a las conclusiones presentadas en nuestro estudio.

H1: *El rendimiento en una tarea cíclica de punteo estará relacionado con la estructura de la variabilidad mostrada, de forma que un mayor rendimiento en la tarea conllevará una estructura de la variabilidad del resultado más irregular y menos autocorrelacionada.*

- ✓ X Se confirma parcialmente esta hipótesis, debido a que la relación entre el rendimiento y la estructura de la variabilidad obtenida fue observada únicamente en la tarea sin constreñir, donde los participantes con menor dispersión en sus valores mostraban una estructura de la variabilidad más irregular y menos autocorrelacionada. Sin embargo, las relaciones existentes entre el rendimiento y la estructura de la variabilidad observada, desaparecieron cuando los niveles de constreñimiento de la ejecución de la tarea incrementaron al tener que ajustarse a una diana o una recompensa.

H2: *La introducción de un constreñimiento que afecte sobre el rendimiento en una tarea motora cíclica afectará a la estructura de la variabilidad mostrada en el rendimiento.*

H2.1: *La inclusión de una diana en la habilidad de punteo supondrá un mayor nivel de constreñimiento de la tarea, y provocará una reducción en la magnitud de la variabilidad del resultado de la acción.*

- ✓ Se confirma esta hipótesis. La introducción de una diana durante la realización de la tarea motora cíclica supuso un incremento en el nivel de constreñimiento de la tarea, propiciando una reducción significativa de la magnitud de la variabilidad mostrada por los participantes, derivando así en una mejora del rendimiento que se observa en una disminución de los valores de error, así como de la variabilidad del resultado de la acción.

H2.2: *La inclusión de una diana en la habilidad de punteo modificará la estructura de la variabilidad del resultado de la acción, mostrando una oscilación ensayo a ensayo más irregular y menos autocorrelacionada.*

- ✓ Se confirma esta hipótesis. La realización de la habilidad cíclica de punteo ajustándose a una diana provocó una modificación en la estructura de la variabilidad del resultado, observándose un cambio en sus características al desplazarse de forma significativa hacia valores menos autocorrelacionados de α próximos a 0.5, identificado con la estructura del ruido blanco, aspecto que podría ser considerado como un signo de alto estado de alerta y atención permitiendo una alta flexibilidad para realizar los movimientos de ajuste, derivando así en una estructura de la variabilidad más irregular (mayor FuzzyEn) y menos autocorrelacionada (menor DFA).

H2.3: *La aportación de recompensas en la tarea, manteniendo presente la diana, incrementará el nivel de constreñimiento de ésta, reduciendo el error mostrado por los participantes y con ello la variabilidad del resultado de la acción.*

- ✓ Se confirma esta hipótesis. La aportación de una recompensa durante la realización de la tarea motora cíclica supuso un mayor incremento en el nivel de constreñimiento de la tarea, propiciando una reducción significativa de la magnitud de la variabilidad mostrada por los participantes respecto a la tarea constreñida por una diana. El incremento en el nivel de constreñimiento provocó una mejora del rendimiento respecto a la tarea constreñida por la diana, que se observa en una disminución significativa, tanto del error como de la variabilidad del resultado de la acción.

H2.4: *La aportación de recompensas en la tarea provocará una nueva modificación de la estructura de la variabilidad del resultado de la acción, mostrando una oscilación ensayo a ensayo aún más irregular y menos autocorrelacionada.*

- ✓ Se confirma esta hipótesis. La aportación de una recompensa durante la ejecución de la habilidad cíclica de punteo provocó un incremento mayor en el nivel de constreñimiento comparado con la tarea con diana, observándose cambios significativos en la estructura de la variabilidad del resultado, que se muestran en un desplazamiento hacia valores menos autocorrelacionados de α próximos a 0.5, identificado con la estructura del ruido blanco, aspecto que podría ser considerado como un signo de alto estado de alerta y atención permitiendo una alta flexibilidad para realizar los movimientos de ajuste, derivando en una estructura de la variabilidad más irregular (mayor FuzzyEn) y menos autocorrelacionada (menor DFA).

H3: *La introducción de un constreñimiento que afecte sobre el rendimiento en una tarea motora cíclica, no afectará sobre las características del movimiento no relacionadas con los resultados de precisión.*

H3.1: *El tiempo de movimiento de la tarea cíclica de punteo no se verá afectado por el constreñimiento de la precisión, manteniendo la estructura de la oscilación ensayo a ensayo tanto en irregularidad como en autocorrelación.*

- ✓ Se confirma esta hipótesis. La realización de la tarea cíclica de punteo afectada por un constreñimiento de precisión, como una diana o una diana y recompensa, no provocó efectos sobre la magnitud de la variabilidad del tiempo de movimiento o su estructura, manteniendo estable la oscilación ensayo a ensayo durante la realización de las tareas.

H3.2: *La orientación de la mano en el momento de punteo no se verá afectada por el constreñimiento de la precisión, manteniendo la estructura de la oscilación en la posición de ensayo a ensayo tanto en irregularidad como en autocorrelación.*

- ✗ Se rechaza esta hipótesis. La realización de las tareas de punteo afectadas por el constreñimiento de la precisión provocaron una modificación significativa en la estructura de la oscilación en la posición de ensayo a ensayo, mostrando una estructura más predecible (menor FuzzyEn) y menos autocorrelacionada (mayor DFA). Por lo tanto, se concluye que las exigencias de precisión de una tarea no sólo afectan a los resultados de la acción sino a la forma en la que el participante la ejecuta, siendo factores relacionados entre sí.

H4: *En los ensayos finales de la tarea cíclica de punteo, los participantes mostrarán un mayor nivel de rendimiento y una oscilación ensayo a ensayo menos autocorrelacionada, en comparación con los ensayos iniciales de la tarea.*

- ✖ Se rechaza esta hipótesis. Los resultados en el rendimiento obtenidos en los ensayos finales de la tarea cíclica de punteo mostraron un descenso en el rendimiento observado en el incremento de los valores de error en todas las tareas, independientemente del nivel de constreñimiento al que estaban sometidos. Estas pérdidas de rendimiento se mostraron significativas en las tareas sometidas a un constreñimiento de precisión. La oscilación ensayo a ensayo de la estructura de la variabilidad en los ensayos finales de la tarea de punteo mostró valores más autocorrelacionados en todas las condiciones de ejecución de la tarea en comparación con los ensayos iniciales, manteniéndose así la relación observada inicialmente en esta tesis doctoral entre la magnitud de la variabilidad y su estructura.

7 LIMITACIONES Y PROSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de esta Tesis Doctoral se han tenido en cuenta aquellos aspectos más relevantes que permitieran contrastar las hipótesis y establecer las conclusiones oportunas a partir de los resultados de la investigación. No obstante, a lo largo del proceso se han presentado ciertas dificultades y se han detectado diversas limitaciones durante el planteamiento y desarrollo del diseño experimental, que sirven de punto de partida a un conjunto de propuestas que dará continuidad a esta línea de investigación que analiza los efectos que provocan diferentes niveles de constreñimiento sobre el comportamiento motor.

Una de las principales limitaciones que encontramos en esta investigación es referida al gran número de ensayos necesarios para crear las series temporales. En la literatura específica algunos autores recomiendan una cantidad mínima de 1024 ensayos para realizar análisis con herramientas no lineales de las características que se han utilizado en esta tesis (Holden, 2005). En nuestro estudio piloto se trató de realizar una primera aproximación para determinar el número mínimo de repeticiones necesarias para obtener unos valores aceptables de fiabilidad en la medida. Una de las propuestas de continuidad de esta línea de investigación se centra en tratar de ajustar, a la menor cantidad posible, el número de ensayos necesarios para utilizar este tipo de herramientas no lineales en entornos ecológicos, donde el número de ensayos suelen ser reducidos a menudo por las propias características de la tarea o gesto técnico, permitiendo a entrenadores y técnicos reconocer diferentes comportamientos de los jugadores cuando las tareas se encuentran constreñidas por una diana o un objetivo de precisión. Una futura línea de investigación que se llevará a cabo en el laboratorio de Aprendizaje y Control Motor implicará la realización de estudios de similares características (Caballero y col., 2015) que permitan la utilización de nuevos procedimientos de análisis de los resultados, así como el desarrollo de nuevas herramientas de análisis de la variabilidad más sensibles que ayuden a conocer sus características tanto en habilidades continuas como habilidades discretas, permitiendo así

una mejor comprensión del efecto provocado por los diferentes constreñimientos sobre el comportamiento motor.

En base a los resultados y conclusiones de nuestra investigación, uno de los objetivos para próximas investigaciones se encuentra en la realización de este protocolo sobre gestos deportivos específicos. Los hallazgos obtenidos en esta investigación trazan una posible línea futura de investigación que permita desarrollar procedimientos que determinen si los deportistas se están viendo afectados por los constreñimientos de ejecución de la tarea, ayudando a técnicos y entrenadores a conocer el nivel de esfuerzo, atención o implicación que supone para cada jugador la realización de la tarea planteada.

En nuestro experimento, los niveles más altos de constreñimiento con diferentes niveles de recompensa no provocaron un comportamiento diferente en los participantes. Es posible que las diferencias entre los distintos niveles de recompensa no supusieran una situación lo suficientemente distinta como para afectar a las variables dependientes de nuestro estudio. Futuros trabajos que quieran comparar el efecto de diferentes niveles de recompensa deberían implicar la ampliación de la cuantía o al menos proponer mayores diferencias entre los distintos niveles de esta variable para poder valorar así la influencia de estos condicionantes en la ejecución de la tarea.

Futuros estudios deberían profundizar sobre la relación entre complejidad y rendimiento (Goldberger, Amaral, y col., 2002) a fin evaluar si se trata de una relación causal y cuáles serían las posibles variables mediadoras. La pérdida de relación encontrada en nuestro estudio entre la complejidad mostrada en las series temporales y el rendimiento obtenido en las tareas cuando aumenta la dificultad o, en nuestro caso, el nivel de constreñimiento de la tarea, parece mostrarse contrarios a los resultados obtenidos por trabajos previos (Barbado y col., 2012; Caballero y col., 2015) en tareas de equilibrio. Por tanto, sería necesario profundizar en esta línea de trabajo con el fin de aclarar esta

controversia planteada con nuestros resultados, realizando nuevos trabajos con diferentes niveles de dificultad que nos permitan identificar claramente esta relación.

Otra limitación a considerar sería la influencia que podría tener el nivel inicial de los participantes, así como la estructura de la variabilidad inicial, en la evolución del rendimiento en tareas cíclicas como la que nos ocupa, en la que se realiza un número elevado de ensayos. Futuros estudios o análisis de estos datos podrían esclarecer la relación entre la capacidad de adaptación y el efecto de los constreñimientos. Para conseguir ese objetivo proponemos seguir un protocolo de aprendizaje realizando varios test en diferentes sesiones que permitieran observar el efecto que se produce sobre los participantes. En nuestro estudio se esperaba encontrar un efecto aprendizaje que se reflejara en una mejora sobre las variables de rendimiento. Sin embargo, el efecto observado sobre el rendimiento fue contrario a lo esperado, mostrándose una pérdida de rendimiento en todas las tareas que podría ser debido a diferentes factores, entre los que podría encontrarse la fatiga provocada por el gran número de ensayos realizados durante la realización de la tarea (Gates y Dingwell, 2008) o la pérdida de concentración o atención (Boksem y col., 2005) al tener que mantener durante un largo periodo de tiempo el mismo lugar de impacto sobre el punto criterio.

Numerosos trabajos han utilizado otras tareas diferentes como tareas de equilibrio (Borg y Laxåback, 2010; Deffeyes y col., 2009; Donker y col., 2008; Schmit y col., 2005) ajuste temporal (Chen y col., 2001; Kuznetsov y Wallot, 2011) ajuste espacial (Balasubramaniam y col., 2000; Ramenzoni y col., 2011; Romero y col., 2013). En nuestro experimento la realización de la tarea consistía en una habilidad de punteo realizada con la mano hábil, y no tenemos constancia de si el tipo de habilidad utilizada podría influir en los resultados. Por tanto, futuros estudios en la misma línea utilizando diferentes tareas, continuas, discretas y con diferentes niveles de dificultad podrían ampliar el alcance de las conclusiones de este estudio.

Como fue planteado en la discusión, y a tenor de los resultados obtenidos al comparar el rendimiento y la autocorrelación entre los ensayos iniciales y los ensayos finales, sería necesario abordar los aspectos relacionados con la fatiga que pudieran afectar a los resultados cuando se realiza un número elevado de repeticiones, sobre todo en la fase final de los ensayos. Trabajos previos han relacionado previamente la fatiga con la regularidad de las series temporales (Xie, Guo y Zheng, 2010) o la autocorrelación (Corbeil y col., 2003), mostrando modificaciones en la estructura de la variabilidad al aparecer los procesos de fatiga. Por tanto, parece necesaria la realización de nuevos estudios que analicen los posibles efectos que esta variable pudiera tener sobre el rendimiento, la regularidad y la autocorrelación de la variabilidad motora a medida que avanza la tarea.

Consideramos que para poder abarcar algunas de las limitaciones comentadas y como prospectiva de futuro, sería necesario aumentar la cantidad de la muestra utilizada en nuestro estudio, con el objetivo de agrupar los participantes en función de las variables comentadas, permitiendo así estudiar otros aspectos que pudieran afectar a las relaciones encontradas en esta tesis doctoral.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Abe, T., Chen, Y., y Pham, T. D. (2014). Chaos analysis of brain MRI for studying mental disorders *Biomedical Informatics and Technology*, 257-270. Springer Berlin Heidelberg.
- Adami, C., Ofria, C., y Collier, T. C. (2000). Evolution of biological complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9), 4463-4468.
- Amato, I. (1992). Chaos breaks out at NIH, but order may come of it. *Science*, 256(5065), 1763-1764.
- Bahar, S., Kantelhardt, J., Neiman, A., Rego, H., Russell, D., Wilkens, L., Bunde, A and Moss, F. (2001). Long-range temporal anti-correlations in paddlefish electroreceptors. *EPL (Europhysics Letters)*, 56(3), 454-460.
- Balasubramaniam, R., Riley, M. A., y Turvey, M. T. (2000). Specificity of postural sway to the demands of a precision task. *Gait and Posture*, 11(1), 12-24.
- Bandt, C., y Pompe, B. (2002). Permutation entropy: a natural complexity measure for time series. *Physical Review Letters*, 88(17), 174102.
- Barbado, D., Sabido, R., Vera-Garcia, F. J., Gusi, N., y Moreno, F. J. (2012). Effect of increasing difficulty in standing balance tasks with visual feedback on postural sway and EMG: complexity and performance. *Human Movement Science*, 31(5), 1224-1237.
- Barlett, R., Wheat, J., y Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanics? *Sports Biomechanics*, 6(2), 224-243.
- Bartsch, R., Plotnik, M., Kantelhardt, J. W., Havlin, S., Giladi, N., y Hausdorff, J. M. (2007). Fluctuation and synchronization of gait intervals and gait force profiles distinguish stages of Parkinson's disease. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 383(2), 455-465.
- Bashan, A., Bartsch, R., Kantelhardt, J. W., y Havlin, S. (2008). Comparison of detrending methods for fluctuation analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(21), 5080-5090.
- Beckers, F., Verheyden, B., y Aubert, A. E. (2006). Aging and nonlinear heart rate control in a healthy population. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 290(6), H2560-2570.
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press, Oxford.
- Best, R. J., Bartlett, R., y Sawyer, R. A. (2010). Optimal javelin release. *Journal of Applied Biomechanics*, 11(4), 371-394.
- Bian, C., Qin, C., Ma, Q. D., y Shen, Q. (2012). Modified permutation-entropy analysis of heartbeat dynamics. *Physical Review E*, 85(2), 021906.
- Boksem, M. A. S., Meijman, T. F., y Lorist, M. M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: An ERP study. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 107-116.
- Bootsma, R. J., y Van Wieringen, P. C. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(1), 21-29.
- Borg, F. G., y Laxåback, G. (2010). Entropy of balance-some recent results. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 7(1), 1-11.
- Bruijn, S. M., Bregman, D. J., Meijer, O. G., Beek, P. J., y van Dieen, J. H. (2012). Maximum Lyapunov exponents as predictors of global gait stability: a modelling approach. *Medical Engineering & Physics*, 34(4), 428-436.
- Bruzzo, A. A., Gesierich, B., Santi, M., Tassinari, C. A., Birbaumer, N., y Rubboli, G. (2008). Permutation entropy to detect vigilance changes and preictal states from scalp EEG in epileptic patients. A preliminary study. *Neurological Sciences*, 29(1), 3-9.
- Button, C., MacLeod, M., Sanders, R., y Coleman, S. (2003). Examining movement variability in the basketball free-throw action at different skill levels. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74(3), 257-269.

- Buzzi, U. H., Stergiou, N., Kurz, M. J., Hageman, P. A., y Heidel, J. (2003). Nonlinear dynamics indicates aging affects variability during gait. *Clinical Biomechanics*, 18(5), 435-443.
- Caballero, C., Sabido, R., Barbado, D., y Muelas, R. (2012). Efectos de diferentes procesos de aprendizaje en el lanzamiento de armado clásico en balonmano. En *Investigación e innovación en el deporte*. (pp. 629-635). Paidotribo.
- Caballero, C., Barbado, D., y Moreno, F. J. (2013). El procesado del desplazamiento del centro de presiones para el estudio de la relación complejidad/rendimiento observada en el control postural en bipedestación. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, 6(3), 101-107.
- Caballero, C., Barbado, D., y Moreno, F. J. (2014). Non-linear tools and methodological concerns measuring human movement variability: an overview. *European Journal of Human Movement*, 32, 61-81.
- Caballero, C., Barbado, D., y Moreno, F. J. (2015). What CoP and kinematic parameters better characterize postural control in standing balance tasks? *Journal of Motor Behavior*, 47(6), 550-562.
- Cao, Y., Tung, W.-w., Gao, J., Protopopescu, V. A., y Hively, L. M. (2004). Detecting dynamical changes in time series using the permutation entropy. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 70(4), 046217.1-046217.7.
- Cattell, J. M., y Fullerton, G. S. (1892). The psychophysics of movement. *Mind*, 1(3), 447-452.
- Cavanaugh, J. T., Guskiewicz, K. M., Giuliani, C., Marshall, S., Mercer, V., y Stergiou, N. (2005). Detecting altered postural control after cerebral concussion in athletes with normal postural stability. *British Journal of Sports Medicine*, 39(11), 805-811.
- Cavanaugh, J. T., Kochi, N., y Stergiou, N. (2010). Nonlinear analysis of ambulatory activity patterns in community-dwelling older adults. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 65(2), 197-203.
- Cavanaugh, J. T., Mercer, V. S., y Stergiou, N. (2007). Approximate entropy detects the effect of a secondary cognitive task on postural control in healthy young adults: a methodological report. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 4(1), 1-7.
- Cignetti, F., Kyvelidou, A., Harbourne, R. T., y Stergiou, N. (2011). Anterior–posterior and medial–lateral control of sway in infants during sitting acquisition does not become adult-like. *Gait and Posture*, 33(1), 88-92.
- Clayton, K., y Frey, B. B. (1997). Studies of mental “noise”. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 1(3), 173-180.
- Coey, C. A., Wallot, S., Richardson, M. J., y Van Orden, G. (2012). On the structure of measurement noise in eye-tracking. *Journal of Eye Movement Research*, 5(4), 1-10.
- Corbeil, P., Blouin, J.-S., Bégin, F., Nougier, V., y Teasdale, N. (2003). Perturbation of the postural control system induced by muscular fatigue. *Gait and Posture*, 18(2), 92-100.
- Correll, J. (2008). 1/f noise and effort on implicit measures of bias. *Journal of Personality and Social Psychology*, 94(1), 48-59.
- Costa, M., Goldberger, A., y Peng, C.K. (2002). *Multiscale entropy to distinguish physiologic and synthetic RR time series*. Paper presented at the Computers in Cardiology, Lisbon.
- Costa, M., Goldberger, A. L., y Peng, C.K. (2005). Multiscale entropy analysis of biological signals. *Physical Review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 71(2), 021906.1-021906.18.
- Costa, M., Goldberger, A. L., y Peng, C. K. (2002). Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. *Physical Review Letters*, 89(6), 068102.1-068102.4.
- Costa, M., Peng, C. K., L. Goldberger, A., y Hausdorff, J. M. (2003). Multiscale entropy analysis of human gait dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 330(1–2), 53-60.
- Costa, M. D., Peng, C.K., y Goldberger, A. L. (2008). Multiscale analysis of heart rate dynamics: entropy and time irreversibility measures. *Cardiovascular Engineering*, 8(2), 88-93.

- Chen, W., Wang, Z., Xie, H., y Yu, W. (2007). Characterization of surface EMG signal based on fuzzy entropy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(2), 266-272.
- Chen, Y., Ding, M., y Kelso, J. A. (2001). Origins of timing errors in human sensorimotor coordination. *Journal of Motor Behavior*, 33(1), 3-8.
- Chen, Z., Ivanov, P. C., Hu, K., y Stanley, H. E. (2002). Effect of nonstationarities on detrended fluctuation analysis. *Physical Review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 65(4), 041107.1-041107.15.
- Chow, J. W., Carlton, L. G., Lim, Y. T., Chae, W. S., Shim, J. H., Kuenster, A. F., y Kokubun, K. (2003). Comparing the pre- and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis players' first and second serves: a preliminary study. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 529-537.
- Darling, W. G., Cole, K. J., y Abbs, J. H. (1988). Kinematic variability of grasp movements as a function of practice and movement speed. *Experimental Brain Research*, 73(2), 225-235.
- Davids, K., Glazier, P., Araujo, D., y Bartlett, R. (2003). Movement systems as dynamical systems: the functional role of variability and its implications for sports medicine. *Sports Medicine*, 33(4), 245-260.
- Davids, K., Shuttleworth, R., Button, C., Renshaw, I., y Glazier, P. (2004). "Essential noise" – enhancing variability of informational constraints benefits movement control: a comment on Waddington and Adams (2003). *British Journal of Sports Medicine*, 38(5), 601-605.
- Davids, K. W., Button, C., y Bennett, S. J. (2008). *Dynamics of skill acquisition: A constraints-led approach*: Human Kinetics. Champaign.
- Dawson, B., y Trapp, R. (2004). Research questions about one group. *Basic and clinical biostatistics, 4th edn. Philadelphia: McGraw-Hill Medical*, 118.
- Deffeyes, J. E., Harbourne, R. T., DeJong, S. L., Kyvelidou, A., Stuberg, W. A., y Stergiou, N. (2009). Use of information entropy measures of sitting postural sway to quantify developmental delay in infants. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 6, 34.
- Delignieres, D., Lemoine, L., y Torre, K. (2004). Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23(2), 87-103.
- Delignières, D., y Marmelat, V. (2013). *Theoretical and methodological issues in serial correlation analysis*. In M. J. Richardson, M. A. Riley & K. Shockley (Eds.), *Progress in motor control* (Vol. 782, pp. 127-148): Springer New York.
- Delignières, D., y Torre, K. (2009). *Fractal dynamics of human gait: a reassessment of the 1996 data of Hausdorff y col.* *Journal of Applied Physiology*, 106(4), 1272-1279.
- Delignieres, D., Torre, K., y Lemoine, L. (2008). Fractal models for event-based and dynamical timers. *Acta Psychologica*, 127(2), 382-397.
- Dingwell, J. B., y Cusumano, J. P. (2000). Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking. *Chaos*, 10(4), 848-863.
- Donker, S. F., Ledebt, A., Roerdink, M., Savelsbergh, G. J., y Beek, P. J. (2008). Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children. *Experimental Brain Research*, 184(3), 363-370.
- Donker, S. F., Roerdink, M., Greven, A. J., y Beek, P. J. (2007). Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental Brain Research*, 181(1), 1-11.
- Duarte, M., y Sternad, D. (2008). Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing. *Experimental Brain Research*, 191(3), 265-276.
- Dutta, S., Ghosh, D., y Chatterjee, S. (2013). Multifractal detrended fluctuation analysis of human gait diseases. *Frontiers in Physiology*, 4, 274.
- Eckmann, J.-P., y Ruelle, D. (1985). Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Reviews of Modern Physics*, 57(3), 617-656.

- Eke, A., Herman, P., Kocsis, L., y Kozak, L. R. (2002). Fractal characterization of complexity in temporal physiological signals. *Physiological Measurement*, 23(1), 1-38.
- Ellyett, K., Rogers, P., Farah, C., Veitch, E., Peters, M., y Seccombe, L. (2014). Detrended fluctuation analysis of heart rate demonstrates autonomic dysfunction during progressive hypoxia in patients with parkinson's disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 189, A5058.
- Escudero, J., Abásolo, D., Hornero, R., Espino, P., y López, M. (2006). Analysis of electroencephalograms in Alzheimer's disease patients with multiscale entropy. *Physiological Measurement*, 27(11), 1091-1106.
- Ferguson, C. J. (2009). An effect size primer: A guide for clinicians and researchers. *Professional Psychology: Research and Practice*, 40(5), 532-538.
- Fino, P. C., Mojdehi, A. R., Adjerid, K., Habibi, M., Lockhart, T. E., & Ross, S. D. (2015). Comparing postural stability entropy analyses to differentiate fallers and non-fallers. *Annals of Biomedical Engineering*, 1-10.
- Frank, B., Pompe, B., Schneider, U., y Hoyer, D. (2006). Permutation entropy improves fetal behavioural state classification based on heart rate analysis from biomagnetic recordings in near term fetuses. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 44(3), 179-187.
- Franz, J. R., Francis, C. A., Allen, M. S., O'Connor, S. M., y Thelen, D. G. (2015). Advanced age brings a greater reliance on visual feedback to maintain balance during walking. *Human Movement Science*, 40, 381-392.
- Gates, D. H., y Dingwell, J. B. (2008). The effects of neuromuscular fatigue on task performance during repetitive goal-directed movements. *Experimental Brain Research*, 187(4), 573-585.
- Gibson, C. G. (1979). *Singular points of smooth mappings* (Vol. 25): Pitman publishing. London.
- Gilden, D. L. (1997). Fluctuations in the Time Required for Elementary Decisions. *Psychological Science*, 8(4), 296-301.
- Gilden, D. L. (2001). Cognitive emissions of 1/f noise. *Psychological Review*, 108(1), 33-56.
- Gilden, D. L., Thornton, T., y Mallon, M. W. (1995). 1/f noise in human cognition. *Science*, 267(5205), 1837-1839.
- Glass, L., y Mackey, M. C. (1988). *From clocks to chaos: the rhythms of life*: Princeton University Press. New Jersey.
- Gleick, J. (1997). *Chaos: Making a new science*: Random House. New York: Viking Penguin Inc. Vol 1.
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Peng, C.-K., y Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 1), 2466-2472.
- Goldberger, A. L., Findley, L. J., Blackburn, M. R., y Mandell, A. J. (1984). Nonlinear dynamics in heart failure: implications of long-wavelength cardiopulmonary oscillations. *American Heart Journal*, 107(3), 612-615.
- Goldberger, A. L., Peng, C.K., y Lipsitz, L. A. (2002). What is physiologic complexity and how does it change with aging and disease? *Neurobiology of Aging*, 23(1), 23-26.
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R., Mietus, J., Antman, E. M., y Greenwald, S. (1988). Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: Heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia*, 44(11-12), 983-987.
- Haken, H., Kelso, J. S., y Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51(5), 347-356.
- Hamilton, G. R., y Reinschmidt, C. (1997). Optimal trajectory for the basketball free throw. *Journal of Sports Sciences*, 15(5), 491-504.
- Hamill, J., Haddad, J., Li, L., Heiderscheit, B., y Van Emmerik, R. (2006). Clinical relevance of coordination variability. In K, Davids, S.J. Bennett & K M. Newell (Eds), *Variability in the Movement System: A Multi-Disciplinary Perspective*. Champaign, IL: Human Kinetics. 153-166.

- Hancock, G. R., Butler, M. S., y Fischman, M. G. (1995). On the problem of two-dimensional error scores: measures and analyses of accuracy, bias, and consistency. *Journal of Motor Behavior*, 27(3), 241-250.
- Haran, F. J., y Keshner, E. A. (2008). Sensory reweighting as a method of balance training for labyrinthine loss. *Journal of neurologic physical therapy*, 32(4), 186-191.
- Harbourne, R. T., y Stergiou, N. (2003). Nonlinear analysis of the development of sitting postural control. *Developmental Psychobiology*, 42(4), 368-377.
- Harbourne, R. T., y Stergiou, N. (2009). Movement variability and the use of nonlinear tools: principles to guide physical therapist practice. *Physical Therapy*, 89(3), 267-282.
- Hauge, E. R., Berle, J. O., Oedegaard, K. J., Holsten, F., y Fasmer, O. B. (2011). Nonlinear analysis of motor activity shows differences between schizophrenia and depression: a study using Fourier analysis and sample entropy. *PLoS One*, 6(1), e16291.
- Hausdorff, J. M. (2007). Gait dynamics, fractals and falls: finding meaning in the stride-to-stride fluctuations of human walking. *Human Movement Sciences*, 26(4), 555-589.
- Hausdorff, J. M., Lowenthal, J., Herman, T., Gruendlinger, L., Peretz, C., y Giladi, N. (2007). Rhythmic auditory stimulation modulates gait variability in Parkinson's disease. *European Journal of Neuroscience*, 26(8), 2369-2375.
- Hausdorff, J. M., Mitchell, S. L., Firtion, R., Peng, C.-K., Cudkowicz, M. E., Wei, J. Y., y Goldberger, A. L. (1997). Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease. *Journal of applied physiology*, 82(1), 262-269.
- Hayles, N. K. (1990). *Chaos bound: Orderly disorder in contemporary literature and science*: Ithaca, Cornell Univ Press, 265-295.
- Hernández-Davó, H., Urbán, T., Sarabia, J. M., Juan-Recio, C., y Moreno, F.J (2014). Variable training: effects on velocity and accuracy in the tennis serve. *Journal of Sports Sciences*, 32(14), 1383-1388.
- Ho, T. H., Barbera, L., Saskin, R., Lu, H., Neville, B. A., y Earle, C. C. (2011). Trends in the aggressiveness of end-of-life cancer care in the universal health care system of Ontario, Canada. *Journal of Clinical Oncology*, 29(12), 1587-1591.
- Holden, J. G. (2005). Gauging the fractal dimension of response times from cognitive tasks. In M. A. Riley, G. C. Van Orden (eds), *Contemporary nonlinear methods for behavioral scientists: A webbook tutorial.*, 267-318. Retrieved August 23
- Holden, J. G., Choi, I., Amazeen, P. G., y Van Orden, G. (2011). Fractal 1/f dynamics suggest entanglement of measurement and human performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(3), 935-948.
- Holden, J. G., Van Orden, G. C., y Turvey, M. T. (2009). Dispersion of response times reveals cognitive dynamics. *Psychological Review*, 116(2), 318-342.
- Ihlen, E. A. (2012). Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab. *Frontiers in Physiology*, 3(3), 141.
- Iyengar, N., Peng, C., Morin, R., Goldberger, A. L., y Lipsitz, L. A. (1996). Age-related alterations in the fractal scaling of cardiac interbeat interval dynamics. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 271(4), R1078-R1084.
- Jaric, S., Ferreira, S. M., Tortoza, C., Marconi, N. F., y Almeida, G. L. (1999). Effects of displacement and trajectory length on the variability pattern of reaching movements. *Journal of Motor Behavior*, 31(4), 303-308.
- Kelso, J. (2000). Principles of dynamic pattern formation and change for a science of human behavior. In *Developmental Science and the Holistic Approach*(Bergman, L.R., Cairns, R.B., Nilsson, L-G. and Nystedt, L., eds) pp. 63–83. Erlbaum
- Kelso, J., y Engstrøm, D. A. (2006). *The complementary nature*. The MIT Press: Cambridge.

- Kelso, J. A. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246(6 Pt 2), R1000-1004.
- Kelso, J. A., Holt, K. G., Rubin, P., y Kugler, P. N. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes. *Journal of Motor Behavior*, 13(4), 226-261.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. MIT Press: Cambridge.
- Kello, C. T., Beltz, B. C., Holden, J. G., y Van Orden, G. C. (2007). The emergent coordination of cognitive function. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(4), 551-568.
- Kirchner, M., Schubert, P., Liebherr, M., y Haas, C. T. (2014). Detrended fluctuation analysis and adaptive fractal analysis of stride time data in Parkinson's disease: stitching together short gait trials. *PLoS One*, 9(1), e85787.
- Kloos, H., y Van Orden, G. (2010). Voluntary behavior in cognitive and motor tasks. *Mind and Matter*, 8(1), 19-43.
- Kreuzer, M., Kochs, E. F., Schneider, G., y Jordan, D. (2014). Non-stationarity of EEG during wakefulness and anaesthesia: advantages of EEG permutation entropy monitoring. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 28(6), 573-580.
- Kumar, Y., Dewal, M., y Anand, R. (2014). Epileptic seizure detection using DWT based fuzzy approximate entropy and support vector machine. *Neurocomputing*, 133, 271-279.
- Kuznetsov, N., y Wallot, S. (2011). Effects of accuracy feedback on fractal characteristics of time estimation. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 1-12.
- Ladislao, L., Rabini, R. A., Ghetti, G., y Fioretti, S. Approximate entropy on posturographic data of diabetic subjects with peripheral neuropathy. *Gait and Posture*, 28, S6-S7.
- Lai, S.-C., Mayer-Kress, G., Sosnoff, J. J., y Newell, K. M. (2005). Information entropy analysis of discrete aiming movements. *Acta Psychologica*, 119(3), 283-304.
- Laitio, T., Huikuri, H., Kentala, E., Mäkikallio, T., Jalonen, J., Helenius, H., Sariola-Heinonen, K., Yli-Mäyry, S y Scheinin, H. (2000). Correlation properties and complexity of perioperative RR-interval dynamics in coronary artery bypass surgery patients. *Anesthesiology*, 93(1), 69-80.
- Lake, D. E., Richman, J. S., Griffin, M. P., y Moorman, J. R. (2002). Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 283(3), R789-R797.
- Lamoth, C. J. C., van Lummel, R. C., y Beek, P. J. (2009). Athletic skill level is reflected in body sway: A test case for accelometry in combination with stochastic dynamics. *Gait and Posture*, 29(4), 546-551.
- Latash, M. L. (1993). *Control of human movement*. Champaing, 111.: Human Kinetics publishers.
- Latash, M. L. (2015). *Intentional and unintentional movements within the equilibrium-point hypothesis*. Paper presented at the Progress in Motor Control X., Budapest, Hungary.
- Lebovitch, L. S., y Shehadeh, L. A. (2005). Introduction to fractals. In *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, eds Riley M. A., Van Orden G. C., editors. 178–266.
- Lemoine, L., Torre, K., y Didier, D. (2006). Testing for the presence of 1/f noise in continuation tapping data. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 60(4), 247-257.
- Li, K., Wei, N., Yue, S., Thewlis, D., Fraysse, F., Immink, M., y Eston, R. (2015). Coordination of digit force variability during dominant and non-dominant sustained precision pinch. *Experimental Brain Research*, 233(7), pp 2053-2060.
- Li, P., Liu, C., Wang, X., Li, L., Yang, L., Chen, Y., y Liu, C. (2013). Testing pattern synchronization in coupled systems through different entropy-based measures. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 51(5), 581-591.

- Lin, D., Seol, H., Nussbaum, M. A., y Madigan, M. L. (2008). Reliability of COP-based postural sway measures and age-related differences. *Gait and Posture*, 28(2), 337-342.
- Lipsitz, L. A. (2002). Dynamics of stability: the physiologic basis of functional health and frailty. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 57(3), B115-125.
- Liu, C., Li, K., Zhao, L., Liu, F., Zheng, D., Liu, C., y Liu, S. (2013). Analysis of heart rate variability using fuzzy measure entropy. *Computers in Biology and Medicine*, 43(2), 100-108.
- Liu, S., y Burton, A. W. (1999). Changes in basketball shooting patterns as a function of distance. *Perceptual Motor Skills*, 89(3), 831-845.
- Llobell, J. P., Navarro, M. D. F., y Pérez, J. F. G. (1996). *Manual de psicología experimental*. Valencia: Ariel.
- Mäkikallio, T. H., Koistinen, J., Jordaens, L., Tulppo, M. P., Wood, N., Golosarsky, B., Peng, C.K, Goldberger, A.L y Huikuri, H. V. (1999). Heart rate dynamics before spontaneous onset of ventricular fibrillation in patients with healed myocardial infarcts. *The American Journal of Cardiology*, 83(6), 880-884.
- Mäkikallio, T. H., Ristimäe, T., Airaksinen, K. J., Peng, C.-K., Goldberger, A. L., y Huikuri, H. V. (1998). Heart rate dynamics in patients with stable angina pectoris and utility of fractal and complexity measures. *The American journal of cardiology*, 81(1), 27-31.
- Marwan, N., Wessel, N., Meyerfeldt, U., Schirdewan, A., y Kurths, J. (2002). Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data. *Physical Review E Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 66(2), 026702.1-026702.8.
- Maxwell, S. E., y Delaney, H. D. (1990). Designing experiments and analyzing data: A model comparison approach. Belmont, CA: Wadsworth.
- Maxwell, S. E., y Delaney, H. D. (2004). *Designing experiments and analyzing data: A model comparison perspective* (Vol. 1): London. Psychology Press.
- Menayo, R., Fuentes, J., Moreno, F., Reina, R., y García, J. (2010). Relación entre variabilidad de la práctica y variabilidad en la ejecución del servicio plano en tenis. *Motricidad. European Journal of Human Movement* 25, 75-92.
- Menayo, R., Moreno, F. J., Fuentes, J. P., Reina, R., y Damas, J. (2012). relationship between motor variability, accuracy, and ball speed in the tennis serve. *Journal of Human Kinetics*, 33, 45-53.
- Miller, D. J., Stergiou, N., y Kurz, M. J. (2006). An improved surrogate method for detecting the presence of chaos in gait. *Journal of Biomechanics*, 39(15), 2873-2876.
- Miller, S. (2002). Variability in basketball shooting: practical implications. *International Research in Sports Biomechanics*, 27-34, London: Routledge.
- Morriss, C., Bartlett, R., y Fowler, N. (1997). Biomechanical analysis of the men's Javelin throw at the 1995 World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 12, 31-41.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. *Motor development in Children: Aspects of Coordination and Control*, 34, 341-360.
- Newell, K. M., y Carlton, L. G. (1985). On the relationship between peak force and peak force variability in isometric tasks. *Journal of Motor Behavior*, 17(2), 230-241.
- Newell, K. M., y Carlton, L. G. (1988). Force variability in isometric responses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(1), 37-44.
- Newell, K. M., y Corcos, D. M. (1993). *Variability and motor control*. Champaign: Human Kinetics.
- Newell, K. M., y Slifkin, A. B. (1998). *The nature of movement variability*. In Piek J.P. (Ed.) *Motor behavior and human skill: a multidisciplinary perspective*. Champaign: Human Kinetics.
- Newell, K. M., y Vaillancourt, D. E. (2001). Dimensional change in motor learning. *Human Movement Sciences*, 20(4-5), 695-715.
- Nicolaou, N., y Georgiou, J. (2012). Detection of epileptic electroencephalogram based on permutation entropy and support vector machines. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 202-209.

- Norris, J. A., Marsh, A. P., Smith, I. J., Kohut, R. I., y Miller, M. E. (2005). Ability of static and statistical mechanics posturographic measures to distinguish between age and fall risk. *Journal of Biomechanics*, 38(6), 1263-1272.
- Norris, P. R., Anderson, S. M., Jenkins, J. M., Williams, A. E., y Morris Jr, J. A. (2008). Heart rate multiscale entropy at three hours predicts hospital mortality in 3.154 trauma patients. *Shock*, 30(1), 17-22.
- Olofsen, E., Sleight, J., y Dahan, A. (2008). Permutation entropy of the electroencephalogram: a measure of anaesthetic drug effect. *British Journal of Anaesthesia*, 101(6), 810-821.
- Park, J.H., Kim, S., Kim, C.H., Cichocki, A., y Kim, K. (2007). Multiscale entropy analysis of EEG from patients under different pathological conditions. *Fractals*, 15(04), 399-404.
- Peng, C.-K., Mietus, J. E., Liu, Y., Lee, C., Hausdorff, J. M., Stanley, H. E., Goldberger, A.L. y Lipsitz, L. A. (2002). Quantifying fractal dynamics of human respiration: age and gender effects. *Annals of Biomedical Engineering*, 30(5), 683-692.
- Peng, C. K., Havlin, S., Stanley, H. E., y Goldberger, A. L. (1995). Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 5(1), 82-87.
- Penzel, T., Kantelhardt, J. W., Grote, L., Peter, J.H., y Bunde, A. (2003). Comparison of detrended fluctuation analysis and spectral analysis for heart rate variability in sleep and sleep apnea. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 50(10), 1143-1151.
- Pereira-Fariña, M. (2008). *Una revisión del concepto de intencionalidad en el marco aproximado*. Paper presented at the XIV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica fuzzy. Cuencas Mineras (Mieres - Langreo).
- Pereira-Fariña, M. (2009). A Revision about the Concept of intentionality in an approximate framework. *Mathware and Soft Computing*, 16(1), 5-15.
- Perez, M. A., y Nussbaum, M. A. (2006). Posture and motion variability in non-repetitive manual materials handling tasks. *Human Movement Sciences*, 25(3), 409-421.
- Pincus, S. (1995). Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 5(1), 110-117.
- Pincus, S. M. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(6), 2297-2301.
- Pincus, S. M., y Goldberger, A. L. (1994). Physiological time-series analysis: what does regularity quantify? *American Journal of Physiology*, 266(4 Pt 2), H1643-1656.
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., y Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956-966.
- Prigogine, I., Stengers, I., y Toffler, A. (1984). *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature* (Vol. 13): Bantam books New York.
- Rabinovich, M. I., y Abarbanel, H. D. I. (1998). The role of chaos in neural systems. *Neuroscience*, 87(1), 5-14.
- Ramdani, S., Tallon, G., Bernard, P. L., y Blain, H. (2013). Recurrence quantification analysis of human postural fluctuations in older fallers and non-fallers. *Annals of Biomedical Engineering*, 41(8), 1713-1725.
- Ramenzoni, V. C., Davis, T. J., Riley, M. A., Shockley, K., y Baker, A. A. (2011). Joint action in a cooperative precision task: nested processes of intrapersonal and interpersonal coordination. *Experimental Brain Research*, 211(3-4), 447-457.
- Ramos-Villagrasa, P. J., y García-Izquierdo, A. L. (2011). Técnicas de análisis de patrones caóticos: revisión de estudios empíricos en Psicología. *Anales de Psicología* 27(1), 239-248.
- Rathleff, M. S., Samani, A., Olesen, C. G., Kersting, U. G., y Madeleine, P. (2011). Inverse relationship between the complexity of midfoot kinematics and muscle activation in patients with medial tibial stress syndrome. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21(4), 638-644.

- Razali, N. M., y Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33.
- Rezek, I., y Roberts, S. J. (1998). Stochastic complexity measures for physiological signal analysis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 45(9), 1186-1191.
- Rhea, C., Kiefer, A. W., Wright, W. G., Raisbeck, L. D., y Haran, F. J. (2015). Interpretation of postural control may change due to data processing techniques. *Gait and Posture*, 41(2), 731-735.
- Rhea, C. K., Silver, T. A., Hong, S. L., Ryu, J. H., Studenka, B. E., Hughes, C. M., y Haddad, J. M. (2011). Noise and complexity in human postural control: interpreting the different estimations of entropy. *PLoS One*, 6(3), e17696.
- Richman, J. S., y Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 278(6), 2039-2049.
- Riley, M., Balasubramaniam, R., y Turvey, M. (1999). Recurrence quantification analysis of postural fluctuations. *Gait and Posture*, 9(1), 65-78.
- Riley, M. A., y Turvey, M. T. (2002). Variability of determinism in motor behavior. *Journal of Motor Behavior*, 34(2), 99-125.
- Robins, M., Wheat, J., Irwin, G., y Bartlett, R. (2006). The effect of shooting distance on movement variability in basketball. *Journal of Human Movement Studies*, 50(4), 217-238.
- Roerdink, M., De Haart, M., Daffertshofer, A., Donker, S., Geurts, A., y Beek, P. (2006). Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Experimental Brain Research*, 174(2), 256-269.
- Roerdink, M., Hlavackova, P., y Vuillerme, N. (2011a). Center-of-pressure regularity as a marker for attentional investment in postural control: A comparison between sitting and standing postures. *Human Movement Sciences*, 30(2), 203-212.
- Roerdink, M., Hlavackova, P., y Vuillerme, N. (2011b). Effects of plantar-flexor muscle fatigue on the magnitude and regularity of center-of-pressure fluctuations. *Experimental Brain Research*, 212(3), 471-476.
- Romero, V., Coey, C., Beach, A., y Richardson, M. J. (2013). *Effects of target size and symmetry on the structure of variability in precision aiming*. Paper presented at the Proceedings of the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society, Austin.
- Sabido, R., Caballero, C., y Moreno, F.J. (2009). Análisis de la variabilidad entre diferentes situaciones en el lanzamiento de tres puntos en baloncesto. *RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte*, 17(5), 76-87.
- Santarcangelo, E. L., Scattina, E., Carli, G., Balocchi, R., Macerata, A., y Manzoni, D. (2009). Modulation of the postural effects of cognitive load by hypnotizability. *Experimental Brain Research*, 194(2), 323-328.
- Santhanam, M. S., Bandyopadhyay, J. N., y Angom, D. (2006). Quantum spectrum as a time series: Fluctuation measures. *Physical Review E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 73(2), 015201.1-015201.4.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological review*, 82(4), 225-260.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., y Quinn, J. T., Jr. (1979). Motor-output variability: a theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 47(5), 415-451.
- Schmit, J. M., Regis, D. I., y Riley, M. A. (2005). Dynamic patterns of postural sway in ballet dancers and track athletes. *Exp Brain Res*, 163(3), 370-378. doi: 10.1007/s00221-004-2185-6
- Schmit, J. M., Riley, M. A., Dalvi, A., Sahay, A., Shear, P. K., Shockley, K. D., y Pun, R. Y. (2006). Deterministic center of pressure patterns characterize postural instability in Parkinson's disease. *Experimental Brain Research*, 168(3), 357-367.

- Scholz, J. P., Schöner, G., y Latash, M. L. (2000). Identifying the control structure of multijoint coordination during pistol shooting. *Experimental Brain Research*, *135*(3), 382-404.
- Seely, A. J. E., y Macklem, P. T. (2004). Complex systems and the technology of variability analysis. *Critical Care*, *8*(6), R367-R384.
- Sherwood, D. E., y Schmidt, R. A. (1980). The relationship between force and force variability in minimal and near-maximal static and dynamic contractions. *Journal of Motor Behavior*, *12*(1), 75-89.
- Sherwood, D. E., Schmidt, R. A., y Walter, C. B. (1988). The force/force-variability relationship under controlled temporal conditions. *Journal of Motor Behavior*, *20*(2), 106-116.
- Slifkin, A. B., y Newell, K. M. (1999). Noise, information transmission, and force variability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(3), 837-851.
- Smith, B. A., Stergiou, N., y Ulrich, B. D. (2011). Patterns of gait variability across the lifespan in persons with and without down syndrome. *Journal of Neurologic Physical Therapy: JNPT*, *35*(4), 170-177.
- Stergiou, N. (2004). *Innovative analyses of human movement*: Champaign, Human Kinetics Publishers.
- Stergiou, N., y Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Sciences*, *30*(5), 869-888.
- Stergiou, N., Harbourne, R., y Cavanaugh, J. (2006). Optimal movement variability: a new theoretical perspective for neurologic physical therapy. *Journal of Neurology Physical Therapy*, *30*(3), 120-129.
- Stins, J. F., Michielsen, M. E., Roerdink, M., y Beek, P. J. (2009). Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: effects of expertise, vision and cognition. *Gait and Posture*, *30*(1), 106-109.
- Strogatz, S. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Cambridge, MA: Westview Press.
- Tapanainen, J. M., Thomsen, P. E. B., Køber, L., Torp-Pedersen, C., Mäkikallio, T. H., Still, A. M., Lindgren, K. S. Huikuri, H. V. (2002). Fractal analysis of heart rate variability and mortality after an acute myocardial infarction. *The American Journal of Cardiology*, *90*(4), 347-352.
- Theiler, J., Eubank, S., Longtin, A., Galdrikian, B., y Farmer, J. D. (1992). Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, *58*(1), 77-94.
- Thelen, E., y Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge: MIT press
- Thuraisingham, R. A., y Gottwald, G. A. (2006). On multiscale entropy analysis for physiological data. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *366*, 323-332.
- Thurner, S., Mittermaier, C., y Ehrenberger, K. (2002). Change of complexity patterns in human posture during aging. *Audiology and Neurotology*, *7*(4), 240-248.
- Torre, K., Balasubramaniam, R., y Delignieres, D. (2010). Oscillating in synchrony with a metronome: serial dependence, limit cycle dynamics, and modeling. *Motor Control*, *14*(3), 323-343.
- Torre, K., y Delignieres, D. (2008). Unraveling the finding of 1/f beta noise in self-paced and synchronized tapping: a unifying mechanistic model. *Biological Cybernetics*, *99*(2), 159-170.
- Toweill, D., Sonnenthal, K., Kimberly, B., Lai, S., y Goldstein, B. (2000). Linear and nonlinear analysis of hemodynamic signals during sepsis and septic shock. *Critical care medicine*, *28*(6), 2051-2057.
- Toweill, D. L., Kovarik, W. D., Carr, R., Kaplan, D., Lai, S., Bratton, S., y Goldstein, B. (2003). Linear and nonlinear analysis of heart rate variability during propofol anesthesia for short-duration procedures in children. *Pediatric Critical Care Medicine*, *4*(3), 308-314.
- Tsuji, Y., Asakawa, T., Hitomi, Y., Todo, A., Yoshida, T., y Mizuno-Matsumoto, Y. (2013). Detrended fluctuation analysis of photoplethysmography in diabetic nephropathy patients on hemodialysis. *In Brain and Health Informatics* (pp. 218-224). Maebashi: Springer.

- Turvey, M. T. (1996). Dynamic touch. *American Psychologist*, *51*(11), 1134-1152.
- Tyldesley, D., y Whiting, H. (1975). Operational timing. *Journal of Human Movement Studies*, *1*(4), 172-177.
- Underwood, B. J., y Shaughnessy, J. J. (1975). *Experimentation in psychology*. New York: John Wiley & Sons.
- Urbán, T., Gutiérrez, O., y Moreno, F. J. (2015). Effects of unstable conditions on kinematics and performance variables in young handball players. *Journal of Human Kinetics*, *46*, 39-48.
- Urbán, T., Moreno, F.J., y Hernández-Davó, H. (2012). Variabilidad cinemática en relación con el rendimiento en el saque en jóvenes tenistas. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, *29*, 49-60.
- Vaillancourt, D. E., y Newell, K. M. (2002). Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease. *Neurobiology of Aging*, *23*(1), 1-11.
- Van Orden, G. (2009). Voluntary performance. *Medicina*, *46*(9), 581-594.
- Van Orden, G. C., Kloos, H., y Wallot, S. (2011). Living in the pink: Intentionality, wellbeing, and complexity. In *Philosophy of complex systems. handbook of the philosophy of science* (pp 629-672). Oxford: Cliff Hooke.
- Varela, M., Jimenez, L., y Fariña, R. (2003). Complexity analysis of the temperature curve: new information from body temperature. *European Journal of Applied Physiology*, *89*(3-4), 230-237.
- Vereijken, B., Emmerik, R. E. A. v., Whiting, H. T. A., y Newell, K. M. (1992). Free(z)ing Degrees of Freedom in Skill Acquisition. *Journal of Motor Behavior*, *24*(1), 133-142.
- Viswanathan, G. M., Peng, C.-K., Stanley, H. E., y Goldberger, A. L. (1997). Deviations from uniform power law scaling in nonstationary time series. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, *55*(1), 845.
- Vollmer, F. (2001). The control of everyday behaviour. *Theory and Psychology*, *11*(5), 637-654.
- Ward, L. M. (2002). *Dynamical cognitive science*. Cambridge: MIT press.
- Washburn, A., Coey, C. A., y Richardson, M. J. (2013). Intentional constraints on the dynamics of human performance and behavioral variability in motor control. In M. Knauff, M. Pauen, N. Sebanz, & I. Wachsmuth (Eds.), *Proceedings of the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 172-177). Austin: Cognitive Science Society.
- Wijnants, M. L., Bosman, A. M., Hasselman, F., Cox, R. F., y Van Orden, G. C. (2009). 1/f scaling in movement time changes with practice in precision aiming. *Nonlinear Dynamics Psychol Life Sci*, *13*(1), 79.
- Williams, A. M., Davids, K., y Williams, J. G. (1999). *Visual perception and action in sport*. London: Taylor and Francis Group.
- Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., y Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, *16*(3), 285-317.
- Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Journal of Nervous and Mental Disease*, *26*(12), 743-752.
- Woollacott, M., y Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait and Posture*, *16*(1), 1-14.
- Worringham, C. J. (1991). Variability effects on the internal structure of rapid aiming movements. *Journal of Motor Behavior*, *23*(1), 75-85.
- Xie, H. B., Guo, J. Y., y Zheng, Y. P. (2010). Fuzzy approximate entropy analysis of chaotic and natural complex systems: detecting muscle fatigue using electromyography signals. *Annals of Biomedical Engineering*, *38*(4), 1483-1496.
- Zbilut, J. P., Thomasson, N., y Webber, C. L. (2002). Recurrence quantification analysis as a tool for nonlinear exploration of nonstationary cardiac signals. *Medical Engineering Physics*, *24*(1), 53-60.

Referencias bibliográficas

- Zbilut, J. P., y Webber, C. L. (2006). Recurrence quantification analysis. *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Zhang, F., Shan, L., Liu, Y., Neville, D., Woo, J. H., Chen, Y., Korotcov, A., Lin, S., Huang, S., Sridhar, R., Liang, W y Wang, P. C. (2013). An anti-PSMA bivalent immunotoxin exhibits specificity and efficacy for prostate cancer imaging and therapy. *Advanced Healthcare Materials*, 2(5), 736-744.



9 ANEXOS

Anexo 1. Resultados de los participantes en las variables de error, autocorrelación y regularidad en la tarea sin diana.

PART.	SIN DIANA											
	ERROR			AUTOCORRELACIÓN				REGULARIDAD				
	ML	AP	ERM	ML	AP	ER	TM	ML	AP	ER	TM	
1	1.73±0.62	2.71±0.36	3.26±0.47	0.960	0.861	0.857	0.091	0.090	0.103	0.084	0.297	
2	0.88±0.74	4.10±1.08	4.26±1.07	0.870	1.207	1.193	0.819	0.095	0.029	0.039	0.146	
3	0.63±0.13	0.47±0.18	0.51±0.17	0.929	1.267	1.300	0.150	0.120	0.014	0.014	0.297	
4	0.84±0.30	1.84±0.67	1.97±0.65	1.154	1.227	1.206	0.721	0.032	0.018	0.012	0.217	
5	1.37±1.56	2.49±1.05	5.18±1.26	0.909	0.985	1.027	0.463	0.119	0.162	0.109	0.115	
6	2.71±0.27	0.57±0.17	0.89±0.23	0.551	0.869	0.746	0.194	0.056	0.142	0.144	0.266	
7	0.88±0.27	0.23±0.17	0.48±0.26	0.746	1.111	0.824	0.462	0.093	0.031	0.115	0.276	
8	1.81±0.64	1.49±0.89	1.82±0.90	1.063	1.058	1.099	0.237	0.097	0.086	0.096	0.266	
9	0.21±2.03	1.29±1.91	3.07±2.44	0.785	1.143	1.169	0.076	0.186	0.099	0.092	0.306	
10	1.02±3.84	1.03±0.88	4.96±3.76	0.862	1.097	0.987	0.117	0.126	0.076	0.108	0.280	
11	0.39±1.06	1.87±0.95	2.51±1.02	0.468	0.596	0.484	0.113	0.246	0.254	0.230	0.288	
12	1.32±0.77	5.01±1.27	5.24±1.13	1.038	1.486	1.028	0.443	0.096	0.015	0.128	0.000	
13	0.31±0.96	1.96±1.68	2.89±1.31	0.666	0.731	0.716	0.787	0.205	0.239	0.180	0.237	
14	0.66±0.74	0.96±0.32	1.75±0.65	1.054	1.059	1.116	0.113	0.077	0.059	0.085	0.301	
15	0.20±0.35	0.83±0.30	2.85±0.34	0.638	0.569	0.537	0.557	0.258	0.272	0.260	0.246	
16	0.63±0.74	0.89±0.58	1.40±0.71	0.977	1.194	1.132	0.147	0.102	0.056	0.051	0.250	
17	0.16±1.23	0.99±0.72	1.93±1.17	0.343	0.918	0.657	0.056	0.245	0.174	0.211	0.291	
18	0.65±0.22	0.14±0.12	0.36±0.21	0.590	0.629	0.531	0.833	0.198	0.226	0.166	0.214	
19	0.38±0.34	0.18±0.20	0.47±0.36	1.129	0.935	1.215	0.668	0.085	0.168	0.087	0.204	
20	2.44±0.87	0.66±0.49	1.92±0.82	0.961	0.779	1.256	0.424	0.057	0.046	0.045	0.239	
21	4.70±0.75	0.55±0.47	3.69±0.68	1.043	0.952	1.027	0.091	0.029	0.073	0.031	0.293	
22	1.35±1.04	0.64±0.48	2.01±0.98	1.051	1.007	0.915	0.376	0.070	0.061	0.082	0.192	
23	1.19±0.17	0.53±0.19	0.59±0.19	0.902	1.191	1.164	0.105	0.075	0.014	0.018	0.299	
24	1.58±0.69	0.79±0.51	1.63±0.64	1.243	1.234	1.006	0.173	0.061	0.006	0.039	0.134	
25	0.31±0.51	1.12±0.65	1.44±0.80	0.597	0.609	0.606	0.075	0.202	0.239	0.188	0.300	
26	0.40±1.59	3.77±1.49	5.07±1.75	1.067	1.059	0.958	0.793	0.154	0.156	0.148	0.209	
27	1.72±0.25	0.19±0.15	0.35±0.26	0.975	1.021	0.918	0.070	0.127	0.093	0.136	0.313	
28	3.61±0.20	1.56±0.34	1.58±0.34	0.840	0.943	0.884	0.150	0.105	0.076	0.111	0.287	
29	0.20±2.15	1.53±0.81	12.61±2.7	0.451	0.723	0.620	0.774	0.243	0.220	0.228	0.198	
30	1.31±0.57	1.01±0.62	1.27±0.71	0.819	1.033	0.877	0.114	0.147	0.120	0.143	0.305	
31	0.89±0.32	0.49±0.26	0.75±0.32	1.068	1.206	1.284	0.039	0.027	0.015	0.009	0.317	
32	3.13±0.69	2.71±1.13	3.03±0.99	1.132	1.070	1.158	0.126	0.063	0.023	0.029	0.272	
33	0.25±0.18	0.36±0.10	0.55±0.15	0.648	0.685	0.665	0.334	0.191	0.201	0.167	0.257	
34	12.49±0.9	1.66±0.80	2.29±0.82	1.395	1.198	1.402	0.074	0.024	0.032	0.025	0.295	
35	0.50±0.14	0.10±0.07	0.34±0.13	0.542	0.528	0.480	0.063	0.249	0.250	0.247	0.252	
36	6.74±2.05	0.74±0.61	6.84±1.94	1.241	1.409	1.259	0.347	0.029	0.052	0.031	0.238	
37	0.59±0.45	0.69±0.51	1.04±0.55	0.822	1.079	1.092	0.380	0.154	0.063	0.064	0.288	
38	0.44±0.44	1.68±0.84	1.84±0.84	0.922	0.612	0.932	0.454	0.154	0.216	0.151	0.203	
39	0.71±0.31	0.30±0.17	0.57±0.29	0.934	0.968	0.897	0.636	0.073	0.017	0.088	0.194	
40	0.67±0.86	1.63±0.45	1.91±0.67	0.835	1.112	1.117	0.273	0.107	0.027	0.027	0.253	
41	4.33±0.73	4.93±1.58	5.05±1.54	1.018	1.009	0.997	0.207	0.070	0.068	0.081	0.292	
42	1.44±0.15	0.44±0.14	0.50±0.13	1.040	1.018	0.889	0.275	0.082	0.064	0.112	0.261	

Anexo 2. Resultados de los participantes en las variables de error, autocorrelación y regularidad en la tarea con diana.

CON DIANA											
PART.	ERROR			AUTOCORRELACIÓN				REGULARIDAD			
	ML	AP	ERM	ML	AP	ER	TM	ML	AP	ER	TM
1	0.29±0.18	0.13±0.10	0.34±0.16	0.480	0.517	0.480	0.132	0.276	0.265	0.267	0.262
2	0.29±0.26	0.28±0.17	0.44±0.25	0.617	0.543	0.584	0.404	0.210	0.242	0.207	0.201
3	0.15±0.12	0.13±0.09	0.22±0.12	0.463	0.778	0.512	0.141	0.279	0.276	0.264	0.292
4	0.18±0.14	0.14±0.11	0.25±0.15	0.759	0.797	0.766	0.197	0.156	0.164	0.165	0.285
5	0.19±0.14	0.11±0.08	0.24±0.14	0.420	0.781	0.526	0.174	0.284	0.244	0.258	0.276
6	0.14±0.10	0.18±0.12	0.25±0.13	0.394	0.438	0.337	0.535	0.282	0.276	0.264	0.224
7	0.19±0.15	0.19±0.12	0.29±0.16	0.508	0.526	0.521	0.103	0.224	0.196	0.205	0.286
8	0.25±0.19	0.22±0.14	0.36±0.19	0.378	0.596	0.513	0.470	0.272	0.237	0.258	0.275
9	0.17±0.12	0.12±0.10	0.23±0.12	0.378	0.443	0.437	0.052	0.288	0.267	0.258	0.308
10	0.21±0.15	0.15±0.13	0.29±0.15	0.387	0.501	0.486	0.131	0.276	0.260	0.258	0.299
11	0.11±0.08	0.08±0.06	0.15±0.08	0.314	0.502	0.457	0.154	0.247	0.246	0.254	0.284
12	0.15±0.12	0.20±0.14	0.28±0.14	0.431	0.650	0.814	0.204	0.260	0.243	0.253	0.273
13	0.15±0.11	0.27±0.11	0.33±0.12	0.485	0.440	0.401	0.405	0.285	0.286	0.284	0.283
14	0.17±0.11	0.08±0.06	0.20±0.11	0.327	0.529	0.526	0.197	0.271	0.269	0.274	0.292
15	0.18±0.14	0.13±0.11	0.25±0.15	0.442	0.559	0.526	0.158	0.303	0.262	0.264	0.301
16	0.17±0.13	0.38±0.13	0.43±0.14	0.522	0.432	0.472	0.123	0.284	0.270	0.263	0.299
17	0.23±0.15	0.16±0.10	0.29±0.15	0.479	0.667	0.501	0.752	0.272	0.271	0.266	0.173
18	0.32±0.18	0.11±0.12	0.36±0.18	0.441	0.526	0.476	0.645	0.259	0.205	0.241	0.268
19	0.27±0.14	0.18±0.11	0.35±0.12	0.313	0.510	0.363	0.158	0.279	0.287	0.284	0.256
20	0.26±0.28	0.16±0.14	0.34±0.28	0.542	0.845	0.591	0.480	0.216	0.220	0.184	0.233
21	0.40±0.25	0.19±0.13	0.46±0.25	0.428	0.609	0.351	0.138	0.276	0.294	0.292	0.291
22	0.18±0.13	0.13±0.10	0.24±0.13	0.625	0.804	0.654	0.526	0.261	0.199	0.270	0.197
23	0.24±0.11	0.17±0.07	0.31±0.10	0.727	0.499	0.693	0.323	0.246	0.267	0.251	0.219
24	0.28±0.18	0.25±0.12	0.40±0.15	0.440	0.421	0.618	0.108	0.271	0.270	0.261	0.302
25	0.20±0.15	0.14±0.11	0.28±0.14	0.395	0.563	0.480	0.594	0.283	0.266	0.270	0.156
26	0.31±0.17	0.17±0.10	0.37±0.16	0.405	0.459	0.313	0.048	0.283	0.250	0.280	0.318
27	0.26±0.20	0.26±0.16	0.40±0.18	0.501	0.717	0.440	0.070	0.263	0.250	0.240	0.317
28	0.21±0.17	0.14±0.10	0.27±0.16	0.464	0.569	0.573	0.342	0.274	0.264	0.254	0.248
29	0.14±0.09	0.09±0.06	0.17±0.09	0.515	0.565	0.510	0.237	0.273	0.260	0.260	0.290
30	0.17±0.13	0.22±0.13	0.30±0.14	0.495	0.444	0.349	0.068	0.292	0.283	0.288	0.305
31	0.25±0.15	0.09±0.07	0.27±0.15	0.446	0.579	0.462	0.050	0.263	0.264	0.258	0.311
32	0.20±0.15	0.11±0.09	0.25±0.15	0.507	0.621	0.556	0.098	0.260	0.266	0.243	0.309
33	0.18±0.14	0.10±0.08	0.22±0.13	0.519	0.521	0.484	0.438	0.261	0.258	0.257	0.218
34	0.12±0.09	0.08±0.07	0.16±0.10	0.420	0.471	0.432	0.076	0.284	0.277	0.268	0.304
35	0.22±0.17	0.15±0.11	0.30±0.16	0.535	0.748	0.539	0.144	0.261	0.222	0.238	0.276
36	0.14±0.12	0.14±0.12	0.22±0.14	0.501	0.624	0.413	0.365	0.264	0.226	0.235	0.248
37	0.17±0.13	0.12±0.09	0.23±0.13	0.451	0.494	0.478	0.139	0.273	0.263	0.273	0.289
38	0.30±0.20	0.16±0.11	0.36±0.19	0.438	0.499	0.370	0.356	0.213	0.199	0.232	0.263
39	0.19±0.18	0.13±0.11	0.26±0.18	0.670	0.695	0.651	0.779	0.257	0.244	0.212	0.197
40	0.17±0.13	0.19±0.12	0.27±0.14	0.510	0.527	0.501	0.461	0.276	0.267	0.260	0.240
41	0.36±0.23	0.22±0.16	0.46±0.23	0.363	0.519	0.427	0.106	0.282	0.261	0.280	0.262
42	0.24±0.18	0.11±0.09	0.28±0.17	0.531	0.492	0.528	0.309	0.245	0.266	0.238	0.297

Análisis de la variabilidad en diferentes niveles de constreñimiento

Anexo 3. Resultados de los participantes en las variables de error, autocorrelación y regularidad en la tarea con recompensa.

PART.	CON RECOMPENSA										
	ERROR			AUTOCORRELACIÓN				REGULARIDAD			
	ML	AP	ERM	ML	AP	ER	TM	ML	AP	ER	TM
1	0.20±0.13	0.08±0.06	0.23±0.13	0.697	0.580	0.721	0.143	0.253	0.225	0.238	0.290
2	0.13±0.11	0.12±0.10	0.20±0.13	0.565	0.557	0.641	1.018	0.210	0.242	0.207	0.201
3	0.13±0.11	0.12±0.08	0.20±0.11	0.446	0.500	0.516	0.209	0.269	0.272	0.252	0.246
4	0.17±0.11	0.08±0.06	0.20±0.10	0.385	0.292	0.403	0.249	0.288	0.271	0.275	0.280
5	0.18±0.15	0.12±0.08	0.24±0.14	0.741	0.785	0.707	0.471	0.260	0.198	0.239	0.255
6	0.11±0.09	0.11±0.08	0.18±0.09	0.373	0.457	0.612	0.258	0.281	0.276	0.273	0.259
7	0.13±0.10	0.08±0.07	0.17±0.10	0.478	0.468	0.545	0.113	0.273	0.264	0.264	0.301
8	0.16±0.12	0.12±0.09	0.22±0.12	0.420	0.445	0.391	0.349	0.290	0.247	0.264	0.263
9	0.18±0.13	0.26±0.13	0.34±0.14	0.364	0.537	0.434	0.176	0.271	0.273	0.278	0.303
10	0.14±0.10	0.12±0.09	0.20±0.10	0.352	0.403	0.385	0.137	0.293	0.267	0.266	0.283
11	0.10±0.07	0.06±0.05	0.13±0.07	0.377	0.463	0.495	0.162	0.269	0.245	0.249	0.275
12	0.11±0.08	0.10±0.08	0.17±0.09	0.270	0.376	0.579	0.367	0.274	0.290	0.267	0.215
13	0.12±0.08	0.14±0.07	0.20±0.07	0.520	0.489	0.490	0.704	0.287	0.288	0.290	0.175
14	0.13±0.09	0.06±0.05	0.16±0.09	0.376	0.376	0.469	0.098	0.271	0.271	0.274	0.293
15	0.14±0.11	0.12±0.09	0.20±0.11	0.457	0.441	0.567	0.144	0.291	0.293	0.268	0.254
16	0.34±0.17	0.09±0.07	0.36±0.17	0.488	0.588	0.430	0.116	0.288	0.277	0.291	0.303
17	0.16±0.12	0.17±0.12	0.27±0.12	0.382	0.447	0.529	0.079	0.278	0.261	0.260	0.284
18	0.14±0.11	0.10±0.07	0.19±0.11	0.373	0.449	0.563	0.595	0.269	0.268	0.261	0.261
19	0.20±0.13	0.16±0.10	0.28±0.12	0.369	0.363	0.422	0.151	0.285	0.270	0.279	0.257
20	0.12±0.09	0.09±0.06	0.16±0.09	0.368	0.628	0.464	0.227	0.284	0.249	0.272	0.290
21	0.20±0.14	0.11±0.09	0.25±0.13	0.333	0.467	0.426	0.155	0.296	0.289	0.272	0.299
22	0.13±0.10	0.08±0.06	0.17±0.10	0.669	0.558	0.566	0.716	0.256	0.272	0.261	0.183
23	0.16±0.09	0.06±0.05	0.18±0.08	0.530	0.426	0.580	0.452	0.270	0.269	0.273	0.262
24	0.34±0.19	0.24±0.12	0.45±0.16	0.463	0.525	0.448	0.176	0.268	0.271	0.269	0.291
25	0.31±0.17	0.21±0.13	0.41±0.14	0.410	0.558	0.524	0.088	0.283	0.278	0.247	0.304
26	0.14±0.11	0.13±0.09	0.21±0.12	0.303	0.442	0.505	0.235	0.276	0.279	0.256	0.197
27	0.17±0.12	0.16±0.11	0.25±0.13	0.351	0.541	0.530	0.075	0.296	0.260	0.273	0.309
28	0.17±0.13	0.10±0.08	0.22±0.13	0.395	0.584	0.542	0.303	0.279	0.268	0.251	0.264
29	0.11±0.08	0.13±0.08	0.19±0.09	0.489	0.515	0.447	0.110	0.271	0.245	0.270	0.316
30	0.15±0.12	0.11±0.09	0.21±0.12	0.418	0.381	0.426	0.058	0.296	0.289	0.273	0.300
31	0.22±0.16	0.14±0.10	0.29±0.14	0.371	0.502	0.519	0.046	0.283	0.281	0.269	0.306
32	0.13±0.10	0.14±0.09	0.21±0.11	0.505	0.712	0.702	0.263	0.288	0.266	0.255	0.293
33	0.23±0.14	0.17±0.11	0.31±0.12	0.441	0.454	0.472	0.564	0.268	0.259	0.270	0.240
34	0.11±0.09	0.19±0.09	0.23±0.10	0.491	0.458	0.538	0.075	0.280	0.287	0.274	0.299
35	0.17±0.13	0.33±0.12	0.39±0.14	0.446	0.495	0.479	0.163	0.272	0.271	0.268	0.309
36	0.16±0.12	0.15±0.12	0.24±0.14	0.447	0.524	0.542	1.000	0.275	0.250	0.248	0.160
37	0.21±0.16	0.20±0.13	0.31±0.16	0.529	0.652	0.558	0.348	0.258	0.242	0.262	0.275
38	0.20±0.12	0.08±0.06	0.23±0.12	0.526	0.481	0.449	0.357	0.268	0.277	0.264	0.269
39	0.11±0.09	0.07±0.05	0.14±0.08	0.584	0.746	0.486	0.604	0.258	0.272	0.254	0.198
40	0.13±0.09	0.12±0.09	0.19±0.10	0.440	0.551	0.560	0.308	0.296	0.272	0.262	0.244
41	0.14±0.11	0.10±0.08	0.19±0.11	0.352	0.578	0.492	0.121	0.294	0.275	0.264	0.293
42	0.22±0.15	0.20±0.12	0.32±0.16	0.508	0.599	0.458	0.506	0.262	0.221	0.237	0.274

Anexo 4. Estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos en los test en las variables de error y tiempo de movimiento en las tres condiciones experimentales.

ApEn	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2
ML	0.109 ± 0.048	0.189 ± 0.011 ^A	0.194 ± 0.005 ^{AB}	124.016	<0.001	0.752
AP	0.094 ± 0.06	0.187 ± 0.013 ^A	0.191 ± 0.007 ^A	97.638	<0.001	0.704
ER	0.093 ± 0.053	0.189 ± 0.015 ^A	0.195 ± 0.008 ^{AB}	147.354	<0.001	0.782
TM	0.158 ± 0.043	0.167 ± 0.032	0.175 ± 0.02	2.871	0.62	0.065

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial; TM= Tiempo de movimiento

Anexo 5. Estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos en los test en las variables de error y tiempo de movimiento en las tres condiciones experimentales.

SampEn	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2
ML	0.084 ± 0.042	0.158 ± 0.019 ^A	0.166 ± 0.011 ^{AB}	135.618	<0.001	0.768
AP	0.075 ± 0.049	0.157 ± 0.013 ^A	0.163 ± 0.011 ^B	116.343	<0.001	0.739
ER	0.07 ± 0.045	0.154 ± 0.021 ^A	0.163 ± 0.014 ^{AB}	150.422	<0.001	0.786
TM	0.124 ± 0.038	0.135 ± 0.032	0.14 ± 0.024 ^A	3.383	0.39	0.076

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial

Anexo 6. Estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos en los test en las variables de azimut, elevación y rotación en las tres condiciones experimentales.

ApEn	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2
Azimut	0.111 ± 0.04	0.815 ± 0.032 ^A	0.069 ± 0.036 ^A	24.016	<0.001	0.369
Elevación	0.087 ± 0.039	0.071 ± 0.034	0.063 ± 0.029 ^A	8.688	<0.001	0.175
Rotación	0.107 ± 0.047	0.077 ± 0.035 ^A	0.066 ± 0.037 ^A	17.599	<0.001	0.300

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

Anexo 7. Estadísticos inferenciales de los valores de regularidad obtenidos en los test en las variables de azimut, elevación y rotación en las tres condiciones experimentales.

SampEn	Sin Diana	Con Diana	Con Recompensa	F	p	η_p^2
Azimut	0.082 ± 0.302	0.651 ± 0.248 ^A	0.540 ± 0.029 ^A	21.146	<0.001	0.340
Elevación	0.072 ± 0.032	0.060 ± 0.029	0.0534 ± 0.025 ^A	8.236	<0.001	0.167
Rotación	0.079 ± 0.035	0.063 ± 0.027 ^A	0.051 ± 0.029 ^{AB}	13.350	<0.001	0.246

ANOVA de medidas repetidas.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto a la ausencia de diana. ^B Diferencias significativas respecto a la presencia de diana.

Anexo 8. Evolución del error radial por minuto en la tarea con recompensa de los participantes en el estudio.

Part.	Tiempo de tarea										ERM
	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
1	0.24±0.12	0.25±0.15	0.23±0.12	0.30±0.17	0.19±0.12	0.19±0.13	0.23±0.11	0.22±0.12	0.20±0.09	0.21±0.13	0.23±0.13
2	0.19±0.12	0.22±0.17	0.19±0.12	0.17±0.12	0.17±0.10	0.17±0.10	0.21±0.15	0.19±0.10	0.23±0.15	0.15±0.13	0.20±0.13
3	0.23±0.13	0.23±0.12	0.24±0.10	0.27±0.15	0.29±0.11	0.31±0.12	0.28±0.13	0.27±0.11	0.28±0.13	0.27±0.12	0.27±0.12
4	0.24±0.14	0.17±0.09	0.18±0.09	0.18±0.09	0.18±0.11	0.19±0.10	0.20±0.09	0.20±0.10	0.21±0.10	0.22±0.12	0.20±0.11
5	0.21±0.13	0.16±0.09	0.2±0.13	0.19±0.11	0.17±0.12	0.19±0.12	0.22±0.13	0.20±0.09	0.22±0.11	0.17±0.09	0.19±0.11
6	0.19±0.12	0.19±0.12	0.18±0.11	0.20±0.11	0.16±0.09	0.19±0.12	0.16±0.07	0.21±0.13	0.18±0.09	0.19±0.10	0.19±0.11
7	0.29±0.10	0.27±0.11	0.28±0.11	0.25±0.12	0.25±0.10	0.29±0.10	0.26±0.11	0.29±0.12	0.33±0.14	0.33±0.13	0.28±0.12
8	0.18±0.12	0.22±0.09	0.21±0.09	0.22±0.11	0.19±0.09	0.18±0.09	0.20±0.09	0.20±0.10	0.20±0.10	0.19±0.08	0.20±0.10
9	0.17±0.08	0.16±0.09	0.17±0.10	0.16±0.09	0.14±0.09	0.16±0.08	0.17±0.10	0.18±0.11	0.17±0.08	0.17±0.09	0.16±0.09
10	0.24±0.13	0.25±0.14	0.27±0.14	0.25±0.14	0.23±0.11	0.23±0.14	0.26±0.13	0.23±0.12	0.25±0.17	0.25±0.13	0.25±0.13
11	0.16±0.10	0.17±0.11	0.17±0.11	0.20±0.10	0.16±0.09	0.17±0.10	0.17±0.08	0.16±0.10	0.17±0.09	0.15±0.09	0.17±0.10
12	0.17±0.08	0.16±0.07	0.16±0.08	0.15±0.07	0.18±0.08	0.19±0.08	0.20±0.09	0.19±0.08	0.20±0.08	0.20±0.07	0.18±0.08
13	0.41±0.13	0.45±0.13	0.45±0.15	0.41±0.17	0.42±0.15	0.46±0.15	0.41±0.17	0.47±0.18	0.48±0.14	0.51±0.19	0.45±0.16
14	0.22±0.15	0.17±0.10	0.18±0.10	0.20±0.11	0.22±0.13	0.22±0.11	0.27±0.13	0.29±0.15	0.28±0.17	0.33±0.16	0.24±0.14
15	0.20±0.10	0.20±0.09	0.18±0.09	0.17±0.08	0.17±0.08	0.19±0.09	0.15±0.08	0.17±0.09	0.15±0.09	0.19±0.09	0.18±0.09
16	0.16±0.09	0.14±0.09	0.14±0.08	0.15±0.08	0.18±0.11	0.17±0.10	0.17±0.10	0.18±0.10	0.19±0.10	0.19±0.10	0.17±0.10
17	0.25±0.14	0.27±0.14	0.28±0.15	0.24±0.11	0.26±0.14	0.28±0.13	0.38±0.14	0.42±0.15	0.43±0.16	0.39±0.14	0.32±0.16
18	0.33±0.13	0.36±0.14	0.39±0.11	0.40±0.13	0.43±0.12	0.42±0.11	0.46±0.17	0.49±0.16	0.45±0.11	0.40±0.13	0.41±0.14
19	0.26±0.15	0.20±0.12	0.24±0.14	0.20±0.11	0.20±0.12	0.19±0.10	0.18±0.08	0.22±0.12	0.19±0.09	0.24±0.13	0.21±0.12
20	0.24±0.13	0.23±0.13	0.24±0.13	0.22±0.11	0.29±0.13	0.27±0.12	0.24±0.14	0.28±0.15	0.24±0.14	0.26±0.13	0.25±0.13
21	0.24±0.14	0.20±0.11	0.19±0.10	0.25±0.15	0.23±0.13	0.21±0.13	0.20±0.11	0.23±0.14	0.2±0.13	0.21±0.12	0.22±0.13
22	0.21±0.11	0.19±0.13	0.2±0.11	0.22±0.11	0.21±0.12	0.25±0.14	0.25±0.12	0.25±0.11	0.22±0.12	0.22±0.13	0.22±0.12
23	0.16±0.09	0.19±0.07	0.19±0.08	0.21±0.09	0.19±0.09	0.19±0.09	0.18±0.08	0.19±0.08	0.18±0.08	0.19±0.09	0.19±0.09
24	0.19±0.10	0.18±0.10	0.19±0.10	0.21±0.13	0.19±0.10	0.22±0.13	0.22±0.14	0.20±0.11	0.22±0.12	0.23±0.12	0.21±0.12
25	0.24±0.11	0.25±0.14	0.28±0.14	0.25±0.14	0.26±0.13	0.30±0.12	0.31±0.14	0.34±0.15	0.33±0.14	0.32±0.15	0.29±0.14
26	0.22±0.11	0.23±0.09	0.21±0.09	0.19±0.11	0.23±0.12	0.21±0.12	0.22±0.12	0.17±0.10	0.19±0.11	0.21±0.12	0.21±0.11
27	0.27±0.11	0.27±0.12	0.33±0.13	0.30±0.09	0.32±0.12	0.32±0.12	0.32±0.13	0.33±0.09	0.34±0.10	0.35±0.10	0.31±0.12
28	0.24±0.11	0.24±0.09	0.24±0.11	0.23±0.09	0.25±0.07	0.24±0.07	0.24±0.09	0.22±0.09	0.23±0.12	0.22±0.10	0.23±0.10
29	0.34±0.14	0.33±0.13	0.35±0.14	0.32±0.12	0.34±0.16	0.34±0.15	0.33±0.16	0.31±0.14	0.34±0.14	0.35±0.15	0.34±0.14
30	0.32±0.17	0.36±0.15	0.37±0.17	0.35±0.17	0.35±0.17	0.38±0.16	0.36±0.16	0.36±0.19	0.36±0.15	0.37±0.17	0.36±0.17
31	0.37±0.10	0.37±0.12	0.37±0.12	0.39±0.14	0.44±0.15	0.40±0.13	0.39±0.16	0.39±0.15	0.39±0.14	0.39±0.14	0.39±0.14
32	0.19±0.10	0.20±0.08	0.21±0.09	0.19±0.10	0.19±0.08	0.20±0.09	0.20±0.11	0.22±0.10	0.21±0.10	0.21±0.10	0.20±0.10
33	0.12±0.06	0.10±0.06	0.11±0.07	0.11±0.06	0.13±0.07	0.14±0.06	0.14±0.06	0.16±0.06	0.14±0.06	0.16±0.07	0.13±0.07
34	0.18±0.12	0.18±0.09	0.16±0.08	0.18±0.09	0.17±0.08	0.18±0.09	0.15±0.09	0.17±0.07	0.14±0.07	0.18±0.10	0.17±0.09
35	0.20±0.06	0.19±0.06	0.19±0.08	0.20±0.07	0.20±0.07	0.20±0.08	0.20±0.06	0.22±0.08	0.22±0.07	0.20±0.08	0.20±0.07
36	0.21±0.13	0.20±0.11	0.22±0.11	0.22±0.13	0.27±0.14	0.26±0.14	0.27±0.15	0.25±0.13	0.28±0.17	0.21±0.14	0.24±0.14
37	0.16±0.10	0.14±0.09	0.17±0.09	0.16±0.08	0.16±0.09	0.15±0.08	0.17±0.08	0.15±0.09	0.15±0.09	0.16±0.09	0.16±0.09
38	0.32±0.18	0.41±0.17	0.32±0.16	0.33±0.16	0.28±0.12	0.28±0.14	0.30±0.17	0.25±0.14	0.35±0.17	0.31±0.14	0.31±0.16
39	0.16±0.10	0.18±0.09	0.19±0.10	0.24±0.12	0.22±0.12	0.23±0.11	0.25±0.12	0.28±0.12	0.26±0.12	0.26±0.10	0.23±0.12
40	0.14±0.08	0.13±0.07	0.12±0.07	0.14±0.09	0.16±0.09	0.18±0.11	0.15±0.09	0.16±0.08	0.13±0.08	0.14±0.07	0.14±0.08
41	0.20±0.10	0.21±0.11	0.21±0.11	0.20±0.10	0.19±0.10	0.18±0.11	0.19±0.08	0.19±0.10	0.19±0.10	0.17±0.09	0.19±0.10
42	0.21±0.11	0.23±0.12	0.20±0.11	0.22±0.09	0.18±0.10	0.21±0.12	0.18±0.09	0.21±0.12	0.17±0.09	0.20±0.11	0.20±0.11

Anexo 9. Estadísticos inferenciales de los resultados de regularidad mostrados por los participantes en las variables analizadas en función de la situación experimental realizada.

ApEn	Recompensa			F	p
	1	2	3		
ML	0.195 ± 0.003	0.195 ± 0.005	0.192 ± 0.006	1.855	.170
AP	0.193 ± 0.004	0.191 ± 0.007	0.189 ± 0.009	.97	.388
ER	0.198 ± 0.004	0.195 ± 0.005	0.194 ± 0.014	.541	.587
TM	0.177 ± 0.016	0.181 ± 0.014	0.167 ± 0.027	1.739	.189

ANOVA de un factor inter-sujeto.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa¹. ^B Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa ².

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial; TM = Tiempo de movimiento.

Anexo 10. Estadísticos inferenciales de los resultados de regularidad mostrados por los participantes en las variables analizadas en función de la situación experimental realizada.

SampEn	Recompensa			F	p
	1	2	3		
ML	0.169 ± 0.006	0.166 ± 0.007	0.163 ± 0.017	1.372	.266
AP	0.165 ± 0.008	0.162 ± 0.010	0.161 ± 0.014	.627	.539
ER	0.165 ± 0.006	0.163 ± 0.012	0.160 ± 0.023	.498	.611
TM	0.143 ± 0.019	0.147 ± 0.015	0.130 ± 0.034	1.958	.155

ANOVA de un factor inter-sujeto.

Las comparaciones múltiples fueron realizadas mediante el ajuste de Bonferroni. ^A Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa¹. ^B Diferencias significativas respecto al nivel de recompensa ².

ML= Eje mediolateral; AP = Eje anteroposterior; ER = Error radial; TM = Tiempo de movimiento.