

**LA TEORÍA DE LOS SISTEMAS DINÁMICOS Y
EL ENTRENAMIENTO DEPORTIVO**

Tesis doctoral presentada por:

Carlota Torrents Martín

Universitat de Barcelona
Departament de Teoria i Història de l'Educació

**Institut Nacional d'Educació Física de
Catalunya**

Centre de Barcelona

Programa:

Activitat Física i Esport. Bienio 1999-2001

**LA TEORÍA DE LOS SISTEMAS
DINÁMICOS Y EL ENTRENAMIENTO
DEPORTIVO**

Para optar al título de Doctora por la Universitat de Barcelona

Tesis doctoral presentada por:

Carlota Torrents Martín

Dirigida por:

Dra. Natàlia Balagué i Serre

Dr. Wolfgang Schöllhorn

Lleida, 2005

Torrents, C. La teoría de los sistemas dinámicos y el
entrenamiento deportivo. Tesis Doctoral
Universitat de Barcelona, 2005

Correspondencia:

INEFC
Pda de la Caparrella s/n
25192 Lleida

E-mail: carlotat@inefc.es

Agraïments

Per ser-hi sempre, als meus pares

A l'Agus, per demostrar-me que tot és més fàcil

A la Dra. Natalia Balagué, perquè sense ella no hagués començat aquest treball, i sense ella no l'hagués acabat

Al Dr. Wolfgang Schöllhorn, per les seves preguntes sobre allò que no em preguntava i per les seves respostes a allò que no sabia respondre

A Daniel Ranz, per realitzar els programes informàtics necessaris per a l'anàlisi de les dades

Al Departament de Matemàtica Aplicada I de la UPC, i especialment al Dr. Amadeu Delshams, pel seu interès en aquesta tesi, per organitzar els diferents seminaris d'aplicacions de la teoria dels sistemes dinàmics a l'entrenament esportiu que tant m'ajudaren i pel seu acolliment

Al Dr. Jürgen Perl, per la seva col·laboració, suggeriments i correccions

A Xavier Bàlius i Ventura Ferrer, per la seva gran amabilitat i disposició a l'hora d'ajudar-me a realitzar els tests al CAR de Sant Cugat

A la Dra. Carme Viladrich i al Dr. Antoni Planas, per resoldre'm els dubtes sobre els mètodes estadístics utilitzats

A tot l'equip del Departament de ciències del moviment de la Westfalle Wilhems-Universität de Münster per la seva imprescindible ajuda en la realització dels tests del segon estudi

A Jordi Cebolla i Òscar Farrús, per resoldre totes les angoixes informàtiques per què he passat

A Àlex Gordillo, pels seus consells sempre encertats

A Vanesa Solano, pels seus dibuixos

A Esther Hernández, Vanesa González i Eli Serelde, pel seu esforç, motivació i sacrifici durant els entrenaments, competicions, llargues sessions de proves i totes les altres estones que passarem plegades

*Als estudiants de la Westfälische Wilhems-Universität de Münster, als
esportistes del CAR de Sant Cugat, i a les gimnastes de gimnàstica
aeròbica que participaren com a subjectes experimentals*

*Als entrenadors del CAR de Sant Cugat que accediren a que els seus
esportistes participessin en aquesta tesi*

*A Maribel Pérez, al Dr. Javier Olivera, al Dr. Gerard Moras, a Nati
Ernàiz, a Jordi Calvo i a tots els tècnics de suport a la recerca que
han estat durant aquests anys a l'INEFC de Barcelona*

*A tots els treballadors de la biblioteca de l'INEFC de Barcelona actuals
i als que ja han marxat per ajudar-me en tot el que han pogut i
perquè durant tot el temps que vaig estar allà fent aquest treball
m'arribaren a considerar com una part més de l'"equip"*

Al departament d'audiovisuals de l'INEFC de Barcelona

*A Vanessa Chirveches, Mercè Seguí i Herminia Cabrejas, per fer de
models en les fotografies*

*A totes les biblioteques i centres de documentació on vaig trobar les
referències esmentades*

*A l'INEFC de Barcelona, per les beques de recerca i pel seu suport
tant material com humà*

*A l'INEFC de Lleida, per la seva gran ajuda, i als meus companys,
perquè m'han "obligat" a acabar la tesi creant-me el desig de seguir
amb ells*

*Al grup de dansa M'organitzo del Club Inef de Lleida per dansar el
marc teòric i permetre'm viure'l i per tant aprendre'l*

...the dancer and the dance are bound forever. But this is no rigid dance, no fixed arrangement of the parts, no machine. The parts, the players express themselves, their autonomy even as they dance together. How can this be? ...

Scott Kelso (M'organitzo, Lleida 2004)

GLOSARIO

ANNs: Redes neuronales artificiales

C: Carga

CC: Carga clásica o cuantitativa

CD: Carga diferencial, en cuanto al número de diferencias o variaciones o carga cualitativa

CEA: Ciclo de estiramiento-acortamiento

CMJ: Counter Movement Jump o salto con contramovimiento

Dev. Ori: Desviación original

Dev. Opt: Desviación optimizada

DJ: Drop Jump o salto con profundidad

DS: Retardo de estrés

DSO: Retardo de estrés con sobrecarga

DR: Retardo de respuesta

DST: Teoría de los sistemas dinámicos

DT: Entrenamiento diferencial

EMG: Electromiografía

et al.: y colaboradores

F: Fuerza

FD: Flexión con el brazo derecho

FI: Flexión con el brazo izquierdo

Fig.: Figura

FIG: Federación Internacional de Gimnasia

FISAF: Federación Internacional Deportiva de Aeróbic y Fitness

FS: Flexión dislocada

FT: Transformación de Fourier

F_x: Componente x de la fuerza

F_y: Componente y de la fuerza

F_z: Componente Z de la fuerza

GA: Algoritmo genético

GMP: Patrón general de movimiento

HKB: Haken-Kelso-Bunz

HRV: Heart Rate Variability o Variabilidad de la frecuencia cardiaca

Hz: Hertzio

KFM: Kohonen Feature Map

Irel: Intensidad relativa

Iv: Impulso vertical

m: metro

n: Número

N: Newton

Pef: Performance o rendimiento

r: Coeficiente de correlación de Pearson

R²: Coeficiente de determinación

Rep: Repeticiones

RFEG: Real Federación Española de Gimnasia

s: Segundo

SC: Salto en carpa

SCG: Salto en carpa con ½ giro

SE: Salto en espagat

SNC: Sistema nervioso central

t: Tiempo

t_i: Tiempo inicial

t_f: Tiempo final

TT: Entrenamiento tradicional

TGS: Teoría general de sistemas

V: Función potencial

? : Relación fase

ÍNDICE

I- INTRODUCCIÓN	17
II- PARTE TEÓRICA	25
1- INTRODUCCIÓN.....	27
1.1- OBJETIVOS DE LA PARTE TEÓRICA	29
2- ANTECEDENTES DE LA TEORÍA DE LOS SISTEMAS DINÁMICOS (TSD).....	30
2.1- LAS PRIMERAS TEORÍAS SISTÉMICAS	31
2.2- EL DESARROLLO DE LAS TEORÍAS DE LA COMPLEJIDAD	40
2.3- ¿POR QUÉ APLICAR LA TSD EN EL ESTUDIO DEL MOVIMIENTO HUMANO? 44	
3- IMPLICACIONES EN EL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN. 48	
3.1- LIMITACIONES DE LA CIENCIA CLÁSICA	49
3.2- LA TSD Y SU APLICACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN.....	51
3.3- VARIABLES E INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS APLICADOS EN LA INVESTIGACIÓN DEPORTIVA A PARTIR DE LA EXPANSIÓN DE LAS APLICACIONES DE LA TSD	54
3.3.1- <i>El PerPot metamodel</i>	57
4- APROXIMACIÓN CONCEPTUAL A LA TSD	61
4.1-SISTEMA DINÁMICO	61

4.2- ESPACIO DE FASES O ESPACIO DE ESTADOS Y LA RELACIÓN FASE.....	62
4.3-LA TRAYECTORIA DEL SISTEMA.....	63
4.4- LOS ATRACTORES PUNTUALES Y DE CICLO LÍMITE	64
4.5-LA CUENCA DEL ATRACTOR Y LAS SEPARATRICES	67
4.6-LOS REPELENTES	68
4.7- LOS ATRACTORES CAÓTICOS	69
4.8- LA AUTOORGANIZACIÓN.....	73
4.9- LAS VARIABLES COLECTIVAS O PARÁMETROS DE ORDEN	74
4.10- LOS GRADOS DE LIBERTAD.....	75
4.11- LOS PARÁMETROS DE CONTROL Y LAS BIFURCACIONES	75
4.12- LAS FLUCTUACIONES	77
4.13- EL TIEMPO DE RELAJACIÓN Y EL CRITICAL SLOWING DOWN	78
4.14- LOS “ERRORES” Y LA VARIABILIDAD	78
4.15- LA HISTÉRESIS Y LA INTERMITENCIA	80
4.16- LA DINÁMICA INTRÍNSECA DEL SISTEMA Y LA DINÁMICA DE LA TAREA Y EL PROCESO DE COOPERACIÓN-OPOSICIÓN	81
4.17- EL MOVIMIENTO Y LA DINÁMICA DEL SISTEMA.....	82
4.18-LA COORDINACIÓN ABSOLUTA Y LA COORDINACIÓN RELATIVA	82
4.19- EL TRIPARTITE SCHEME	83

5- APLICACIONES DE LA TSD AL ESTUDIO DE LA COORDINACIÓN MOTRIZ.....	85
5.1- EL MODELO HKB	86
5.2- GENERALIZACIÓN DE LA APLICACIÓN DE LA TSD EN EL ESTUDIO DE LA COORDINACIÓN DE MOVIMIENTOS CÍCLICOS	93

5.3- APORTACIONES DE LA TSD EN EL APRENDIZAJE MOTOR	105
5.3.1- <i>Las teorías sobre aprendizaje motor</i>	106
5.3.2- <i>El aprendizaje de acciones motrices desde la perspectiva de la TSD</i>	110
5.3.3- <i>El aprendizaje durante el desarrollo motor</i>	122
5.4- APLICACIONES DE LA TSD AL ESTUDIO DE MOVIMIENTOS DISCRETOS.....	130
5.4.1- <i>El ciclo percepción-acción</i>	132
5.4.2- <i>Aplicaciones al estudio de tareas deportivas</i>	134
5.5- APLICACIONES DE LA TSD AL ESTUDIO DE LA AUTOORGANIZACIÓN ENTRE PERSONAS EN TAREAS DE COOPERACIÓN-OPOSICIÓN	139
5.5.1- <i>Aplicaciones en el estudio de tareas deportivas</i>	142

6- APLICACIONES DE LA TSD A LA FISIOLÓGÍA HUMANA

146

7- APLICACIONES DE LA TSD AL ESTUDIO DE LA POSTURA HUMANA

153

8- APLICACIONES DE LA TSD A LOS MÉTODOS DE ENTRENAMIENTO DEPORTIVO

162

8.1- INDIVIDUALIZACIÓN DEL ENTRENAMIENTO	167
8.2- GLOBALIZACIÓN DEL ENTRENAMIENTO	169
8.3- EL APRENDIZAJE O EL ENTRENAMIENTO BASADO EN LA VARIACIÓN DE ESTÍMULOS	173
8.3.1- <i>El aprendizaje diferencial</i>	178
8.4- LA TRANSFERENCIA	187

8.5- FACILITACIÓN DEL APRENDIZAJE MEDIANTE LA ADAPTACIÓN DEL MEDIO O ENTORNO O MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL.....	190
---	-----

III- PARTE EMPÍRICA195

1- INTRODUCCIÓN197

1.1- OBJETIVOS DE LA PARTE EMPÍRICA.....	200
--	-----

2- ESTUDIO 1 – EL ENTRENAMIENTO DIFERENCIAL EN LA GIMNASIA AERÓBICA202

2.1- INTRODUCCIÓN	202
-------------------------	-----

2.1.1- <i>Características de la gimnasia aeróbica</i>	202
---	-----

2.1.2- <i>Entrenamiento de la gimnasia aeróbica</i>	205
---	-----

2.1.3- <i>Aplicación del entrenamiento diferencial en la gimnasia aeróbica</i>	207
--	-----

2.2- MATERIAL Y MÉTODOS	210
-------------------------------	-----

2.2.1- <i>Sujetos</i>	210
-----------------------------	-----

2.2.2- <i>Material</i>	211
------------------------------	-----

2.2.3- <i>Periodos de estudio</i>	211
---	-----

2.2.4- <i>Protocolo del estudio</i>	212
---	-----

2.2.5- <i>Análisis de los datos</i>	218
---	-----

2.3- RESULTADOS	219
-----------------------	-----

2.3.1- <i>Resultados de las flexiones de tres apoyos</i>	219
--	-----

2.3.1.2- <i>Cuantificación de las variables</i>	219
---	-----

2.3.1.2- <i>Interacción carga-rendimiento de las flexiones de tres apoyos</i>	223
---	-----

2.3.1.2.1- <i>Interacción carga-rendimiento de la flexión</i>	
---	--

con el brazo derecho del sujeto 1	224
2.3.1.2.2- Interacción carga-rendimiento de la flexión con el brazo izquierdo del sujeto 1.....	227
2.3.1.2.3- Interacción carga-rendimiento de la flexión dislocada del sujeto 1	229
2.3.1.2.4- Interacción carga-rendimiento de las flexiones de tres apoyos del sujeto 2	232
2.3.2- <i>Resultados de los saltos</i>	234
2.3.2.1- <i>Cuantificación de las variables</i>	234
2.3.2.2- <i>Interacción carga-rendimiento de los saltos</i>	237
2.3.2.2.1- Interacción carga-rendimiento del sujeto 1 en los saltos	237
2.3.2.2.2- Interacción carga-rendimiento del sujeto 2 en los saltos	241
2.4- DISCUSIÓN.....	243
2.4.1- <i>Discusión de los resultados de las flexiones de tres apoyos</i>	243
2.4.2- <i>Discusión de los resultados de los saltos</i>	248

3- ESTUDIO 2- FLUCTUACIONES Y ESTABILIDAD EN LA EJECUCIÓN DEL SALTO VERTICAL	250
3.1- INTRODUCCIÓN.....	250
3.1.1- <i>El salto vertical</i>	250
3.1.2- <i>La estabilidad</i>	255
3.1.3- <i>El salto vertical y la estabilidad</i>	257
3.2- MATERIAL Y MÉTODO	261
3.2.1- <i>Sujetos</i>	261
3.2.2- <i>Material</i>	262
3.2.3- <i>Protocolo del estudio A- Saltos desde diferentes distancias</i>	263
3.2.4- <i>Protocolo del estudio B: Saltos desde diferentes alturas</i>	264
3.2.5- <i>Protocolo del Estudio C</i>	266
3.2.6- <i>Análisis de los datos</i>	267
3.3- RESULTADOS	268

3.3.1- Repetitividad del test (Estudios A y B)	268
3.3.2- Estudio A: Saltos aumentando la distancia	268
3.3.3- Estudio B: Saltos aumentando la altura	276
3.3.4- Clustering de los estudios A y B	282
3.3.5- Estudio C: Repetición de los estudios A y B con otro grupo de población	285
3.4- DISCUSIÓN	288

IV- CONCLUSIONES..... 297

1- CONCLUSIONES DE LA PARTE TEÓRICA.....299

2- CONCLUSIONES DE LA PARTE EMPÍRICA.....301

2.1- CONCLUSIONES DEL ESTUDIO 1: EL ENTRENAMIENTO DIFERENCIAL EN LA GIMNASIA AERÓBICA	301
2.2- CONCLUSIONES DEL ESTUDIO 2: FLUCTUACIONES Y ESTABILIDAD EN LA EJECUCIÓN DEL SALTO VERTICAL	302

V- PERSPECTIVAS DE FUTURO.....303

VI- BIBLIOGRAFÍA.....309

ANEXO I.....365

ANEXO 2.....373

I- INTRODUCCIÓN

El entrenamiento deportivo ha estado marcadamente influenciado por la concepción mecanicista del ser humano. A pesar de que constantemente se aluda a la necesidad de integrar todos los aspectos del entrenamiento y se propongan tendencias más holísticas, la estructura conceptual dominante sigue siendo la visión cartesiana que concibe a los organismos vivos prácticamente como máquinas constituidas por diferentes partes. Se extiende la idea de individualización y se es consciente de la limitación de la teoría clásica del entrenamiento para responder a las necesidades constantemente cambiantes de los deportistas, pero se siguen utilizando métodos de entrenamiento basados en la reducción del organismo en constituyentes más pequeños.

La investigación ha cosechado grandes logros basándose en esta concepción cartesiana, y en gran parte fruto de esta investigación el entrenamiento ha sufrido un progreso espectacular en las últimas décadas. No obstante, este enfoque no puede resolver ni demostrar la utilidad de cualquier método de entrenamiento basado en el funcionamiento de los sistemas vivos como unidades que interactúan con el entorno de forma integral.

A lo largo del siglo XX han surgido diversas teorías que han provocado un cambio sustancial en multitud de ramas de la ciencia. La concepción de los organismos vivos como un todo que interactúa con el medio y el descubrimiento de ecuaciones que pueden describir el comportamiento de los seres vivos han afectado el conocimiento de áreas tan distintas como las matemáticas, la física, la psicología, o la economía. Estas teorías ya no se centrarán en la reducción de los sistemas en componentes más pequeños, sino que los enfocarán de forma integral centrándose en los principios básicos de su organización. Estos principios son a menudo comunes para todo tipo de sistemas, y concretamente en los sistemas dinámicos complejos, entre los que se encuentran todos los sistemas vivos, se dará el fenómeno de la autoorganización, que los caracterizará con formas de comportamiento semejantes.

Las ciencias del deporte no son una excepción, y ya muchos investigadores han aplicado las nuevas herramientas y los principios de la autoorganización para explicar el movimiento humano, los cambios fisiológicos que se producen bajo determinadas circunstancias o el aprendizaje motor. También muchos entrenadores han aceptado los conceptos de las teorías globales y proponen a sus atletas métodos de entrenamiento distintos a los tradicionales en los que se trata al individuo como a un todo. Han surgido a su vez actividades físicas alternativas (método Feldenkrais®, Contact-improvisation...), con un origen eminentemente empírico, que se basan en principios estrechamente relacionados con este enfoque.

Pese a este creciente interés, los investigadores deportivos suelen basar sus estudios en el paradigma clásico y son predominantes los estudios basados en la comparación de grupos en los que la individualidad queda enmascarada por la media de los sujetos escogidos. Para calcular dichas medias es imprescindible la cuantificación de los resultados, el uso de la estadística, y no se consideran interesantes para ser analizados los comportamientos individuales. Pero con la utilización de medias se complica el análisis cualitativo de las respuestas, la atención al proceso, al cómo en vez de al cuánto, y por tanto a la comprensión de los fenómenos. Este tipo de estudios no ayudan a demostrar la utilidad de las nuevas prácticas, ya que la concepción del organismo como un todo complica el aislamiento de variables, la individualidad de los atletas no se respeta, y se tiende a explicar qué sucede pero no el porqué de lo que sucede.

Frente a esta problemática, la teoría de los sistemas dinámicos nos ofrece un gran abanico de herramientas y conceptos novedosos para aplicar tanto a la investigación como al entrenamiento deportivo. Su inmersión en las ciencias del deporte se ha producido principalmente en la investigación y en el área del aprendizaje y del control motor. La investigación internacional de este campo está totalmente influenciada por esta perspectiva, que se considera especialmente interesante porque ayuda a comprender cómo aprende y cómo se organiza el organismo en movimiento. Multitud de

estudios basados en este enfoque se centran en investigar esta organización, en buscar aquellas variables que explican el comportamiento global del individuo analizando exhaustivamente a pocos sujetos y considerándolos individualmente. La cuantificación de los resultados se utilizará para demostrar lo observado en el análisis cualitativo. Por lo tanto, el análisis cuantitativo y el cualitativo estarán presentes, pero no se otorgará más importancia a uno que a otro. Las matemáticas cobran una mayor significación en este aspecto, ya que ayudan a configurar los modelos que reducen la complejidad del sistema sin dividirlo en partes, y la estadística colaborará en algunas investigaciones, pero no tendrá que ser necesariamente la parte crucial de todo estudio.

El entrenamiento deportivo es entendido también como un proceso de aprendizaje, por lo que en los últimos años los resultados obtenidos en los estudios pertenecientes al área del aprendizaje motor se han intentado trasladar y aplicar al entrenamiento. Se proponen herramientas de análisis del rendimiento y métodos de entrenamiento basados en los principios de la teoría de los sistemas dinámicos, a la vez que aumenta la comprensión del comportamiento de los atletas. Cada vez son más los investigadores que se interesan por este enfoque. La aceptación implícita en él de la influencia de todas las partes del organismo y del entorno en el comportamiento final del individuo, así como la existencia de principios generales aplicables a todos los sistemas, obligan a tener en cuenta los estudios que se han hecho desde las diferentes áreas del conocimiento del ser humano. Se han iniciado colaboraciones con físicos y matemáticos que ayudan a descubrir y describir estos principios de organización, por lo que se requiere un esfuerzo para utilizar un lenguaje que resulte adecuado y común para describir los diferentes fenómenos en cualquier tipo de sistemas. Este enfoque pluridisciplinar de las ciencias de la actividad física y el deporte se presenta como un reto para la investigación en nuestro campo en el que el conocimiento de la teoría de los sistemas dinámicos puede ser fundamental.

Es por ello que en esta tesis, dividida en una parte teórica y una empírica, se expone en la parte teórica una recopilación de información sobre la aplicación de la teoría de los sistemas dinámicos en las áreas afines al entrenamiento deportivo. A su vez, se describen los conceptos más utilizados, imprescindibles para comprender el interés de la parte empírica. Se revisan también los orígenes de la aparición y aplicación de la teoría en la investigación y en el entrenamiento deportivo. Entre estos orígenes se encuentra la conjunción de diferentes teorías anteriores o paralelas a su aparición, que también son explicadas.

En la parte empírica, se exponen dos estudios en los que se han utilizado herramientas de análisis de los sistemas dinámicos y se han aplicado los conceptos para proponer nuevos métodos de entrenamiento y para explicar el comportamiento de los atletas. En el primero de ellos, se estudia la efectividad de un método de entrenamiento que pretende respetar y aprovechar la capacidad de autoorganización de los organismos: el entrenamiento diferencial. A su vez, se comparan dos herramientas de análisis para evaluar los resultados obtenidos, una basada en técnicas de análisis esencialmente lineales y otra en técnicas no lineales, y dos métodos de cuantificación de la carga, uno tradicional y otro basado en el número de variaciones de la carga. A partir de las conclusiones de este estudio, se observó la necesidad de encontrar una variable que pudiese objetivizar la evolución cualitativa del sistema y que demostrase además que la ejecución de las acciones motrices deportivas que se habían llevado a cabo en el primer estudio se rige por los mismos principios de autoorganización que los de cualquier otro fenómeno propio de un sistema dinámico complejo. Por ello se diseñó un segundo estudio que analizase la aparición de fluctuaciones y de señales de no-linealidad durante la ejecución de acciones motrices deportivas. Se estudió el comportamiento de diferentes deportistas durante la realización de saltos verticales analizando la no-linealidad de las series temporales de la aplicación de la fuerza sobre una plataforma durante la fase de impulso para demostrar que los principios de la autoorganización aparecen durante su ejecución. Finalmente, y a partir de las conclusiones de

la parte teórica y de la parte empírica se presentan las perspectivas de futuro. En esta última parte se sugieren nuevas líneas de investigación y se expone el último estudio que se está llevando a cabo y que pretende analizar la no-linealidad de las series temporales de la aplicación de la fuerza sobre una plataforma de diferentes deportistas realizando flexiones con un brazo hasta que se produce el fallo muscular.

De la misma forma que la investigación de la aplicación de la teoría de los sistemas dinámicos en el aprendizaje motor se inició mostrando los principios del comportamiento no lineal y de organización de los organismos en movimiento y se investigó cómo éstos aprenden, en esta tesis se ha querido demostrar que estos principios también se aprecian en los organismos cuando ejecutan acciones motrices deportivas y se ha investigado cómo entrenar dichas acciones respetando estos principios y dicha forma de organización.

Así, con esta tesis se pretende:

- Exponer la utilidad de los conceptos y las herramientas de los sistemas dinámicos para optimizar el rendimiento deportivo.
- Identificar principios generales que gobiernan la formación de patrones coordinativos en los sistemas biológicos complejos durante la ejecución por parte de atletas de acciones motrices específicas.
- Demostrar la utilidad de dichos principios del comportamiento para explicar el comportamiento de los atletas durante la práctica deportiva.
- Aplicar un método de entrenamiento fundamentado en esos principios y valorar su utilidad en el incremento del rendimiento deportivo.

II- PARTE TEÓRICA

1- Introducción

En esta parte teórica se explicarán la conjunción de hechos que produjo la aparición y aplicación de los conceptos y las herramientas de la teoría de los sistemas dinámicos (TSD) en las ciencias de la actividad física y el deporte. Entre ellos se encuentra el desarrollo de diferentes teorías con orígenes diversos y el avance tecnológico que permite su evolución. Se distinguirá entre las primeras teorías sistémicas, basadas en la concepción de los organismos como un todo, y las teorías denominadas de la complejidad, para las que el citado avance tecnológico fue crucial. Dentro de este segundo grupo es donde se encuentra la TSD, que será el centro de los siguientes apartados.

Las aplicaciones de esta teoría se extienden a multitud de áreas del conocimiento, pero nos centraremos en las que tratan al ser humano, así como en el cambio de paradigma científico que supone su utilización. Este cambio justificará los métodos de investigación que se aplicarán posteriormente en la parte empírica, basados en el análisis de series temporales, en estudios de casos y en la utilización de una herramienta de análisis no lineal.

En el siguiente apartado, la aproximación conceptual, se explicarán los conceptos más básicos para poder comprender la explicación del comportamiento humano desde esta perspectiva. Términos como el de atractor, bifurcación o autoorganización, comunes en la física o las matemáticas, son prácticamente desconocidos en las ciencias del deporte, pero se vuelven imprescindibles si queremos interpretar los cambios que se producen en el organismo entendido como un sistema dinámico complejo.

A continuación se realiza una revisión bibliográfica sobre las aplicaciones de la teoría que nos ocupa en el estudio del movimiento humano con el fin de enfatizar las grandes posibilidades que ofrece en nuestro campo y poder

establecer posteriormente un paralelismo con los resultados de los estudios empíricos.

Las aplicaciones más estudiadas han sido las relacionadas con la coordinación de movimientos cíclicos, área en la que ya se ha demostrado como multitud de principios de comportamiento de los sistemas dinámicos no lineales se dan en el organismo humano. Estos principios son los que servirán para explicar el comportamiento en las acciones motrices que se describen en la parte empírica. También estarán presentes en este apartado los estudios sobre aprendizaje y desarrollo, ya que la mayor parte de la investigación que relaciona la TSD con el movimiento humano pertenecen a esta área. Estos nos ofrecen la base teórica para poder comprender las nuevas propuestas de entrenamiento, que no dejan de ser métodos de aprendizaje y de creación de nuevos atractores, igual que el proceso de desarrollo humano. También se describen estudios sobre el aprendizaje de movimientos discretos, así como de aplicación de los principios que ya se han demostrado en los movimientos cíclicos. Su inclusión permitirá reforzar las conclusiones sacadas de nuestros estudios, aunque sean de movimientos muy distintos. Se destacarán los trabajos que han utilizado técnicas o movimientos deportivos como foco de análisis. Se incluirán en un apartado especial la explicación del comportamiento de cooperación-oposición entre personas como ejemplo sorprendente del principio de autoorganización, uno de los protagonistas de toda la exposición que se realizará, así como su aplicación clara en el estudio del deporte.

El siguiente apartado tratará la aplicación de la teoría de los sistemas dinámicos al estudio de la postura humana, y servirá para explicar el comportamiento de los atletas en las diferentes posiciones que se adoptan al realizar los ejercicios que se proponen en la parte empírica. Los principios que se asumen ya han sido demostrados en posiciones estáticas o en movimientos de reequilibrio, aunque no en movimientos explosivos.

Finalmente, se analizarán las aplicaciones que se han realizado de los principios teóricos al diseño de métodos de entrenamiento deportivo. Uno de estos métodos y una herramienta de análisis son los protagonistas del primer estudio que se explicará en la parte empírica, y las preguntas que surgieron de ese estudio posibilitaron el diseño del siguiente, por lo que su aparición aquí es fundamental.

1.1- Objetivos de la parte teórica

Los objetivos de esta parte teórica son los siguientes:

- Analizar la utilidad de los conceptos y las herramientas de los sistemas dinámicos para optimizar el rendimiento deportivo.
- Exponer el origen de estos conceptos y herramientas para poder justificar su existencia y demostrar su utilidad.
- Describir los conceptos que posibilitarán la comprensión de los estudios empíricos realizados.
- Explicar los principios de comportamiento de los sistemas dinámicos que aparecen en la ejecución de movimientos coordinativos y deportivos para poder establecer los paralelismos pertinentes con las acciones motrices analizadas posteriormente.
- Revisar el comportamiento no lineal de los seres humanos.
- Proponer nuevos métodos de entrenamiento justificados con los principios de comportamiento demostrados previamente.

2- Antecedentes de la teoría de los sistemas dinámicos (TSD)

Un sistema, según Aracil (1986), puede definirse como una entidad compleja formada por partes en interacción mutua, cuya identidad resulta de una adecuada armonía entre sus constituyentes, y dotada de una sustantividad propia que trasciende a la de esas partes.

El concepto de sistema dinámico proviene originariamente de la mecánica clásica. Éste posee características muy determinísticas, derivadas de la mecánica de Newton y Laplace.

Posteriormente la termodinámica estudiará los sistemas desde una perspectiva diferente, en la que se considera al sistema una entidad en sí, como un todo, y no reducido a partes como en la mecánica clásica. Esto se observa en la denominada “segunda ley” de la termodinámica, o ley de la disipación de la energía. Ésta describe que todo sistema físico aislado o “cerrado” evolucionará espontáneamente en la dirección de un creciente desorden. Para expresar en términos matemáticos precisos esta evolución, los físicos introdujeron una nueva medida que llamaron “entropía”. Según dicha ley, la entropía de un sistema físico cerrado irá incrementándose, y dado que esta evolución viene acompañada de desorden creciente, la entropía puede ser también considerada como una medida de éste.

El concepto de sistema se extendió a otras ciencias, como las sociales, las humanas o en la ingeniería. Las máquinas son sistemas, ya que son entidades complejas formadas por partes en mutua interacción con un comportamiento global que deriva de la armónica coordinación entre sus partes.

A lo largo del siglo XX surgieron diversas teorías desde distintos campos de la ciencia que intentaron estudiar la relación entre los comportamientos y las estructuras que los generan (Aracil, 1986), tal y como se explica en el siguiente apartado.

2.1- Las primeras teorías sistémicas

En biología se cuestionó el consolidado reduccionismo, la división en partes de los organismos, para pasar a enfatizar el todo, el holismo, la perspectiva sistémica o ecológica (Capra, 1996). Las propiedades esenciales de un organismo o sistema viviente serán propiedades del todo que ninguna de las partes posee, emergidas por la interacción entre ellas.

En psicología, la visión mecanicista del ser humano con la consecuente metáfora del hombre-máquina, empezó a modificarse con la aparición de nuevos enfoques, como es el caso de la psicología de la Gestalt (Köhler, 1941).

Gestalt significa en alemán forma orgánica, y el filósofo Christian von Eherengields (1859-1932) fue el primero en usar gestalt en el sentido de una pauta perceptual irreducible. Eherenfileds caracterizaba la gestalt afirmando que el “todo” es más que la suma de las partes. Así, el “todo” será irreducible y los conjuntos organizados exhibirán cualidades ausentes en sus partes. Las condiciones en un lugar influirán sobre lo que sucede en otro lugar y viceversa.

Max Wertheimer recibió varios cursos de este filósofo entre 1898 y 1901, pero no fue hasta 1910 cuando se empezó a fundar la psicología de la Gestalt. Wertheimer quiso entonces demostrar que nuestras percepciones se estructuraban de manera distinta a la estimulación sensorial. Para ello, trabajó con dos de sus ayudantes, Kurt Koffka y Wolfgang Köhler, a quienes también se les considera cofundadores de la escuela (Hergenhahn, 2001).

Los psicólogos Gestalt veían la existencia de “todos” irreductibles como un aspecto claro de la percepción. Para la formación de unidades, lo decisivo será la interrelación que se produce entre los componentes que forman dichas unidades, y no las propiedades de cada uno de los componentes. La dinámica del intercambio decidirá, tal y como afirmó Wolfgang Köhler (Köhler, 1973), qué llega a ser unidad y qué resulta excluido de ella. Para Köhler, todo sistema biológico tiende a alcanzar el mismo estado final mediante diferentes caminos y empezando desde estados iniciales diferentes. Esta tendencia no será producto de un factor inmaterial, tal y como los vitalistas defendieron, sino de las complejas estructuras que se originan espontáneamente de la propia dinámica intrínseca del sistema, idea relacionada con las teorías posteriores que defienden la autoorganización.

Existen numerosos y conocidos ejemplos de los experimentos que se realizaron para mostrar las propiedades de la psicología Gestalt, especialmente acerca del campo visual. La existencia de un patrón geométrico de estímulos no determina totalmente que ciertas formas sean visualizadas o no, porque si se cambia el patrón que lo rodea resultarán unidades y realidades totalmente diferentes (véase fig. 1).

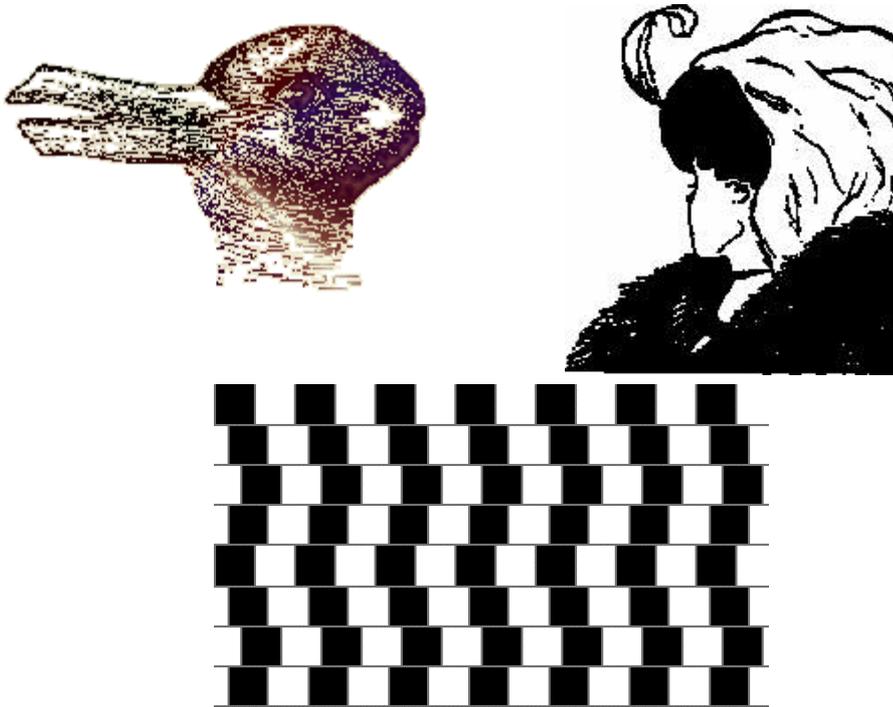


Fig. 1 Ejemplos de figuras ambiguas o reversibles

También en psicología, Gibson describió la perspectiva ecológica (Gibson, 1979). Ésta enfatiza la información que da el medio como causante de las actividades del organismo (entendido siempre como un todo). En sus estudios sobre la visión, Gibson no considerará que ésta depende del ojo, conectado al cerebro. La visión dependerá de los ojos, que están en la cabeza, que está en un cuerpo, que está sobre el suelo, y el cerebro no será más que el órgano central de todo el sistema visual. Se propone un nuevo método para entender la percepción, en el cual se debe describir el medio, la información posible de recibir y el proceso en sí de la percepción.

Surge el concepto de “affordance” para describir lo que ofrece el medio al animal, lo que le proporciona. “Affordance” proviene del término *aufforderungscharakter* de Kurt Lewin, que fue traducido como “invitation character” y como “valence”. Estos conceptos hacían referencia al significado percibido por el observador de cada cosa según la teoría de la

Gestalt. Pero “affordance” tiene una diferencia fundamental: esta propiedad no cambia por la necesidad del observador, es invariante. La cuestión central no será si las “affordances” existen o no, sino si pueden ser percibidas. El medio, las sustancias, las superficies, los objetos, los lugares, y los otros animales son affordances para el organismo en cuestión. Les darán beneficio o perjuicio, vida o muerte. Por eso tienen que ser percibidas. Las posibilidades del medio y la forma de vida van unidas inseparablemente, el medio condiciona lo que hace el organismo.

La física cuántica también se centrará en la importancia de las interconexiones. Capra (1985) describe:

“La perspectiva cartesiana del mundo es mecanicista; en cambio, la visión del mundo que emerge de la física moderna se caracteriza por ser orgánica, holística y ecológica. Se la podría llamar una visión de sistemas, en el sentido de teoría general de sistemas. El mundo ya no puede percibirse como una máquina formada por una gran cantidad de objetos, sino que ha de concebirse como una unidad indivisible y dinámica cuyos elementos están estrechamente vinculados y pueden comprenderse sólo como modelos de un proceso cósmico.”

La teoría general de sistemas, descrita por Ludwig Von Bertalanffy (1976), extendió el pensamiento sistémico a todos los campos de la ciencia. A pesar de que Bertalanffy era biólogo y enfatizó la necesidad de formular una teoría matemática, la teoría general de sistemas es especialmente filosófica (Aracil, 1986). Dicha teoría se generó por la necesidad de resolver problemas de organización y orden y establecer principios universales aplicables a los sistemas en general.

La teoría general de sistemas define como sistema a un complejo de elementos interactuantes y pretende establecer principios generales para todos los sistemas, independientemente de su naturaleza física, biológica o sociológica. La comprensión de la realidad será a partir de su totalidad y los

niveles de dependencia entre los elementos variarán en función del tipo de sistema al que se haga referencia, volviendo así aquí a resaltar la importancia del todo y de las redes de relaciones. Bertalanffy clasifica a los sistemas en abiertos o cerrados. Los cerrados son sistemas físicos aislados, proceden espontáneamente en la dirección de un creciente desorden o entropía, y la energía que se disipa es irrecuperable. Los abiertos, en cambio, necesitan un constante flujo de materia y energía proveniente del entorno a la vez que decrece la entropía. Dentro de este segundo grupo se habla de "sistemas dinámicos", que son todos aquellos cuyo comportamiento puede describirse mediante leyes que dependen del tiempo. Todo organismo viviente es ante todo un sistema abierto, y se mantiene en continua incorporación y eliminación de materia, alcanzando un estado uniforme diferente del estado de equilibrio químico y termodinámico.

La aparición de la teoría general de sistemas coincide temporalmente con otras influyentes como son la cibernética o la teoría de la información, que determinarán la aparición de la primera.

La cibernética (Wiener, 1961) fue en los años 40 una nueva rama de la ciencia que se ocupó de los problemas de la comunicación y del control, agrupando diversas teorías que explicaban tanto el comportamiento de las máquinas como del ser humano. Se utilizaron conceptos tales como información, comunicación, fiabilidad o confianza y realimentación (feedback). Centró su atención en los patrones de organización y en la capacidad de autorregulación del sistema para mantenerse en equilibrio. Estudió los sistemas de control teniendo en cuenta la comunicación entre el sistema y el medio circundante, y dentro del sistema, en el control del funcionamiento del sistema en consideración al medio. Se compara al organismo con una máquina, pretendiendo encontrar elementos comunes entre el funcionamiento de las máquinas automáticas y el sistema nervioso de los seres humanos para desarrollar una teoría capaz de abarcar todo el campo del control y la comunicación en las máquinas y en los organismos vivientes. No obstante, las máquinas cibernéticas son muy distintas de los

mecanismos cartesianos de relojería, debido a la disposición circular de los bucles de realimentación. Wiener consideró fundamental este concepto de feed-back, o su traducción realimentación o retroalimentación (Wiener, 1974). Un bucle de retroalimentación será una disposición circular de elementos conectados causalmente, en la que una causa inicial se propaga alrededor de los eslabones sucesivos del bucle, de forma que cada elemento tiene un efecto sobre el siguiente, retornando al inicio del proceso (véase figura 2). El input o entrada está afectado por tanto por el output o salida y se produce una interacción entre procesos de retroalimentación negativa y positiva que añaden complejidad al patrón anteriormente descrito (véase figura 3). Las teorías contemporáneas modifican este modelo, tal y como se explicará en el apartado 2.3.

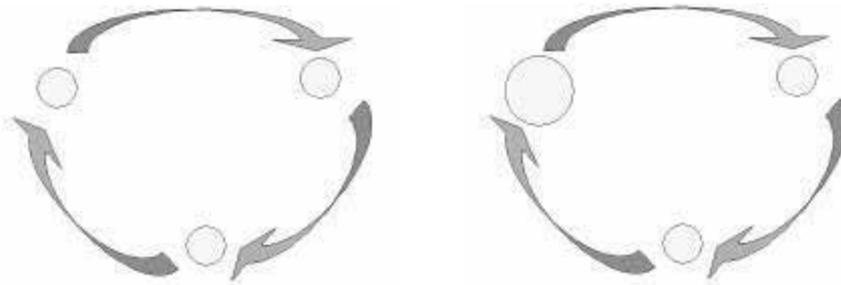


Figura 2 Bucle de retroalimentación positiva en el que todos los elementos están conectados causalmente

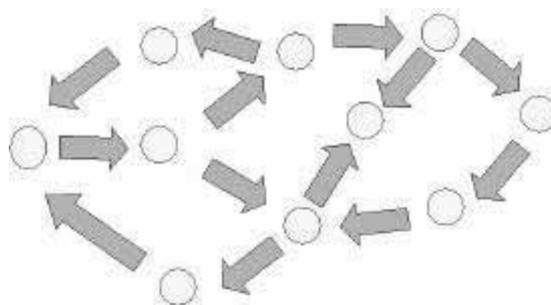


Figura 3 Interacción de bucles de retroalimentación formando una red de causas y efectos

Desde el punto de vista sistémico, uno de los aspectos más importantes del estudio exhaustivo de los bucles de retroalimentación realizado por los cibernéticos es el reconocimiento de que se describen patrones de organización independientes de la estructura física del sistema, aspecto crucial para las teorías contemporáneas. Las estructuras biológicas son multifuncionales: el mismo grupo de componentes anatómicos se utiliza para diferentes funciones (por ejemplo la boca para hablar, comer...) o diferentes componentes realizarán la misma función (por ejemplo los dedos de la mano para escribir).

El sistema nervioso central dejó de ser así un órgano aislado que recibe señales procedentes de los sentidos y que se descarga en los músculos para pasar a formar parte de un proceso circular, paso éste fundamental para estudiar el sistema nervioso como una totalidad integrada. Se defiende también la autoorganización de los sistemas en contraposición a la organización jerárquica que defendían los enfoques más analíticos.

La teoría de la información se relaciona con el resto de teorías por la identificación de los mensajes codificados en la comunicación como patrones de organización. La palabra comunicación fue utilizada en un sentido muy amplio, en el que quedaban incluidos todos los procedimientos mediante los cuales una mente puede ejercer su influencia en otra (Shannon y Weaver, 1998). La palabra información, dentro de la teoría, no se identifica con lo que se “dice”, sino con lo que se “puede decir”, por lo que la información constituiría una medida de la libertad de elección a la hora de seleccionar un mensaje. Se utilizó la entropía como medida de la información (Weaver, 1974). La entropía será la medida de la incertidumbre existente ante un conjunto de mensajes, del cual va a recibirse uno solo. También Wiener consideró que la cantidad de información en un sistema es una medida de su grado de organización (Wiener, 1961). Se construyó una teoría matemática en la cual los diferentes elementos que participan en un sistema de comunicación se representaron mediante entidades matemáticas.

Las corrientes sistémicas influyeron determinantemente también en el pensamiento de una de las figuras fundamentales del estudio del comportamiento motor, N.A. Bernstein (1896-1966) (Bongaardt y Meijer, 2000). Este autor soviético se adelantó sorprendentemente a su época en sus estudios sobre la coordinación y la estructura del ser humano, inspirando la obra de autores muy posteriores. En la época en que la ideología de Paulov dominaba la ciencia en su país, Bernstein estudió la complejidad de las acciones coordinativas intentando reducir las enormes dimensiones del sistema de estudio. La gran dimensionalidad del cuerpo debía reducirse a un sistema controlable caracterizado por el orden, es decir, por patrones estables de coordinación.

Los movimientos ocurren, según Bernstein, por los desequilibrios de las fuerzas causadas por cambios en la tensión muscular, pero no hay una relación de uno a uno. Los movimientos del cuerpo provocan consecuencias mecánicas en el sistema físico, se generan fuerzas centrípetas e inerciales, a la vez que el cuerpo está sometido a la fuerza de la gravedad. Estas fuerzas contribuyen e influyen a todos los movimientos mientras están sucediendo y constituyen un campo de fuerzas en continuo cambio, provocando multitud de variables independientes que afectan a este movimiento.

Para realizar una acción coordinativa se deberá reducir el número de variables independientes que hay que controlar, es decir, se deberán reducir los grados de libertad del sistema. Generalmente el organismo tiene más grados de libertad de los que necesita para realizar una tarea, y debe encontrar una forma para reducir los "superfluos". Se introduce así un concepto que ya había aparecido en el estudio de Sherrington de 1892 de la coordinación neuromuscular para definir las combinaciones complejas de acciones musculares que ocurren en el ser humano con un objetivo definido, las sinergias (Kelso y Schöner, 1988). No obstante, para Sherrington las sinergias estaban basadas en los reflejos, mientras que para Bernstein el reflejo no es más que otra parte que debe coordinarse con las otras partes.

Las sinergias pasaron a ser unidades funcionales, flexibles y temporalmente reunidas de forma específica para cada tarea. De esta forma, un microcomponente puede participar en muchas estructuras coordinativas en diferentes ocasiones, a la vez que una estructura coordinativa puede requerir el uso de microcomponentes diferentes en distintas ocasiones.

Bernstein estudió cómo se producía el aprendizaje, y cómo los principiantes parece que eliminan tetánicamente el exceso de grados de libertad, de manera que se realiza la tarea de forma rígida. Con la experiencia, el cuerpo pierde esta rigidez y es capaz de utilizar de forma más eficaz las fuerzas pasivas del medio, la fricción, la inercia y las fuerzas reactivas. Mediante el estudio de la estructura de la coordinación, el autor buscaba el reflejo de la organización del cerebro. Al mismo tiempo demostró que la organización del movimiento podía ser entendida como la armonización recíproca de muchos procesos cinéticos y informacionales simultáneos. Al darse cuenta de la naturaleza abstracta del fenómeno comprendió la imposibilidad de explicarlo únicamente desde una visión neurofisiológica. Propuso así el modelaje matemático para planear y buscar soluciones (Bongaardt y Meijer, 2000), a pesar de que reconocía que un punto de vista puramente matemático nunca podría capturar toda la organización del movimiento de los seres vivos (Meijer, 1998).

Bernstein identificó como punto de partida para comprender el movimiento de todo el organismo la formulación del programa motor, y como principal corrector de la dinámica de la acción motriz al feedback. Esta fue una hipótesis formulada por él en 1935, anticipándose al enunciado principal de la cibernética que daría unos años más tarde Norbert Wiener (Bernstein, 1967; Bernstein, 1989). Su obra no se tradujo al inglés hasta 1967, por lo que sus ideas tardaron en llegar a occidente. Muchas de ellas son todavía válidas, pero han evolucionado para explicar cómo se forman las sinergias, y cómo se produce la organización del control del aparato locomotor que produce la coordinación.

La influencia de las teorías sistémicas ha afectado también a las ciencias del deporte, especialmente en su vertiente más teórica. Se organiza el entrenamiento desde una concepción sistémica y se concibe al atleta como un sistema que funciona como un todo y que se ve afectado por el medio circundante (Gambetta, 1989; Solé, 1995). Aparece la idea del entrenamiento integrado, donde a través de la técnica y la táctica de la disciplina, se desarrollan los aspectos físicos, psicológicos y visuales. Autores como Fidelus, Viru, Tschiene, Verchoshansky, García Manso o Ruiz y Sánchez Bañuelos conceptualizan el entrenamiento con estos términos planteando el comportamiento del deportista de forma integrada con el ambiente en el que se desarrolla y no explicándolo únicamente desde el punto de vista biológico (Ruiz y Sánchez Bañuelos, 1997; García Manso, 1999; Tschiene, 2002).

Según Solé (2002), actualmente se considera que existen dos grandes tendencias ideológicas sobre el entrenamiento: la biológica, que se basa en una perspectiva analítica que estudia los fenómenos relacionados con el rendimiento de forma aislada; y la holística, que comprende los procesos de preparación del deportista de forma global, como un producto de interacciones de los diversos aspectos que comportan el rendimiento deportivo. El autor considera que la primera tendencia corresponde a lo que se realiza en el laboratorio, mientras que la segunda corresponde al trabajo de campo analizando los fenómenos relacionados con el rendimiento de forma conjunta. Sin embargo, cada vez se realizan más trabajos de campo en biología y probablemente ambas perspectivas pueden ser complementarias.

2.2- El desarrollo de las teorías de la complejidad

A pesar de que la dinámica es hoy un campo interdisciplinar, fue originariamente una rama de la física, cuando Newton en el siglo XVII inventó las ecuaciones diferenciales, descubrió las leyes de la gravitación y

el movimiento universal y las combinó para explicar la ley de Kepler del movimiento planetario. Newton resolvió el problema de los dos cuerpos, pero sus métodos no sirvieron posteriormente para solucionar la cuestión de los tres cuerpos, ya que se producían relaciones muy difíciles, en aquellos momentos imposibles de descifrar. A finales del siglo XIX, el gran matemático Jules Henry Poincaré propuso un nuevo punto de vista, en el cual se enfatizaba la predicción cualitativa en vez de la cuantitativa, desarrollando una perspectiva geométrica para analizar cuestiones como las de los tres cuerpos. Poincaré fue el primero en vislumbrar la posibilidad del caos, en el que un sistema determinista exhibe comportamiento aperiódico que depende sensiblemente de las condiciones iniciales, por lo que las predicciones a largo plazo resultan imposibles (Strogatz, 1994).

El estudio de los sistemas abiertos y la dinámica ha estado sujeto a la ciencia clásica hasta la creación de ordenadores más potentes que permitieron avanzar en matemáticas y en física y desarrollar teorías más complejas, como la comúnmente denominada teoría del caos. Ésta defiende que el comportamiento de los sistemas complejos, tales como el clima, los ecosistemas, los planetas, la evolución de las fluctuaciones del mercado de valores o incluso el comportamiento de nuestro cerebro no tienen nada que ver con los péndulos ideales de los problemas de física clásica. Lo habitual es que los sistemas naturales sean caóticos. Hasta hace unas décadas el comportamiento caótico, aleatorio, era sinónimo de total oscuridad. La teoría del caos ha aportado una nueva luz para mirar todos estos sistemas aparentemente incomprensibles o aleatorios. El caos esconde un orden interno que es posible encontrar. Se ha descubierto la forma de comprender y en cierto modo predecir el comportamiento de sistemas dinámicos complejos empleando ecuaciones matemáticas (Prigogine, 1993).

El caos se puede describir como un comportamiento que es casi determinista, pero que no lo parece. Esto es debido a que los sistemas son sensiblemente dependientes de las condiciones iniciales. Aquellos sistemas en los que pequeñas diferencias pueden resultar en grandes o pequeñas

diferencias son caóticos (Lorenz, 1993). No se podrá predecir con exactitud cualquier fenómeno, pero sí encontrar pautas generales en el comportamiento de los sistemas, encontrar las zonas hacia las cuales el sistema se irá preferentemente (atractores) o conocer los valores críticos de sus parámetros.

Lorenz empezó a estudiar el caos hacia 1960, pero no fue hasta 1970 cuando tuvo su gran apogeo, con figuras como Feigenbaum, que descubrió leyes universales que gobiernan la transición del comportamiento regular al caótico (Feigenbaum, 1980); Mandelbrot, que codificó y popularizó los fractales; o Winfree, que aplicó los métodos geométricos de la dinámica a las oscilaciones biológicas, especialmente a los ritmos circadianos y del corazón (Winfree, 1967).

Otra corriente teórica relacionada es la teoría de las catástrofes (Thom, 1975), que usa el término “catástrofe” en lugar de “bifurcación” (término que se utiliza en la TSD). En esta teoría se define catástrofe como la desaparición de un equilibrio y el establecimiento de otro consecutivo a una modificación continua del potencial. Se ocupa de cambios drásticos formulados mediante determinadas ecuaciones matemáticas. Ésta teoría nos puede ayudar a comprender los procesos adaptativos de los organismos, pero ha recibido numerosas críticas por basarse en principios que no se cumplen en la mayoría de sistemas.

Paralelamente, Haken desarrolla la sinérgica (Haken, 1994), originariamente una teoría física sobre la formación espontánea de estructuras en sistemas abiertos. Defiende que el comportamiento del todo, además de ser mayor que la suma del comportamiento de sus partes, es también diferente debido a la interacción no-lineal entre las partes y entre éstas y su entorno. Por eso Haken define a la sinérgica como el estudio de la acción de conjunto, el estudio de las leyes generales que rigen la formación de estructuras. En física, los diferentes estados de agregación (sólido, líquido, gaseoso) se llaman también fases, y el paso de una fase a

otra, se denomina transición. Este lenguaje se adoptará para describir multitud de procesos característicos de los sistemas abiertos. En éstos se producen transiciones de fase cuando las condiciones ambientales, que se expresan mediante parámetros de control, alcanzan un punto crítico. Las ideas que se desarrollarán se extenderán a otros campos de la ciencia, y colaborarán para responder las preguntas que quedaron sin respuesta en la teoría desarrollada por Bernstein sobre las sinergias musculares. La sinérgica utilizará los conceptos de grados de libertad, variables colectivas, atractores..., conceptos éstos fundamentales para comprender la “estrategia sinérgica” que utilizarán colegas de Haken como Kelso o Shöner para describir y comprender los fenómenos coordinativos. Se empezará a aplicar con ellos las herramientas y los conceptos que nos ofrece la teoría de los sistemas dinámicos en las ciencias del movimiento humano.

La TSD, las matemáticas que ponen orden al caos, surge influenciada por el resto de teorías aquí descritas, utilizada en un principio por Prigogine para describir los cambios observados en sistemas termodinámicos. La TSD es una teoría matemática, cuyos conceptos y técnicas se aplican a un amplio espectro de fenómenos (Capra, 1996). La TSD aplicada a los sistemas vivos se puede definir como una teoría del cambio, que pretende capturar, estudiar y entender las transiciones estructurales y de comportamiento que ocurren en dichos sistemas con su entorno, y ha sido rápidamente adoptada para describir los mecanismos de progresión y desarrollo humanos (Corbetta, Vereijken, 1999; Newell y Molenaar, 1998).

No obstante, las bases se fundaron ya a principios de siglo. Tal y como se ha comentado anteriormente, Poincaré usó los conceptos topológicos para analizar las características cualitativas de problemas dinámicos complejos y sentó así los cimientos de las matemáticas de la complejidad que emergerían un siglo después. Otro importante paso se dio en 1937 con la publicación de “Theory of Oscillations” de Andronov y Chaikin, donde se cuestiona como el estado (x) de un sistema cambia a través del tiempo (dx/dt). Los autores definieron un sistema como autónomo si cambia a través

del tiempo en función sólo de su estado, e hicieron posible el desarrollo de modelos matemáticos para los fenómenos autónomos (Bongaardt y Meijer, 2000; Andronov y Chaikin, 1937).

2.3- ¿Por qué aplicar la TSD en el estudio del movimiento humano?

Todos los conceptos y principios que describen las teorías citadas en el anterior apartado se producen en la naturaleza en todos los sistemas dinámicos a escalas completamente diferentes, desde la organización de la célula aislada hasta el comportamiento global de todo el ecosistema, pasando evidentemente por el organismo humano. Éste posee miles de sistemas de control para mantener valores relativamente constantes que actuarán como sistemas dinámicos, por lo que cuando se rompe el equilibrio será cuando se produzcan los efectos de la retroalimentación negativa y las consecuentes adaptaciones (si hay equilibrio no hay adaptaciones).

Los sistemas de control biológicos actúan respondiendo a los estímulos, pero el esquema estímulo-respuesta lineal sin tener en cuenta las redes supone que el organismo es un sistema esencialmente reactivo que responde como un autómata a estímulos externos, dando a entender que el individuo bien ajustado será la meta última. Éste modelo no tiene sentido (la conducta como satisfacción de necesidades, establecimiento del equilibrio homeostático, interpretaciones utilitarias...), ya que el organismo es un sistema primariamente activo, con autonomía del sistema nervioso. La simple reactividad lineal no puede explicar las actividades espontáneas, los procesos de regulación después de lesiones cerebrales o los procesos de crecimiento, desarrollo y creación, así como las actividades humanas no utilitarias que no sirven a las necesidades primarias de conservación propia y supervivencia como ocurre con tantas manifestaciones culturales (Bertalanffy, 1976).

Las teorías de la complejidad ayudan a resolver este problema entendiendo la retroalimentación como un proceso continuo entre la red del propio sistema y el medio ambiente. Así, el concepto de retroalimentación se ha modificado, y se defiende que todo organismo vivo está constituido por una enorme cantidad de bucles de retroalimentación. Los bucles de retroalimentación difieren de los clásicamente estudiados en cibernética ya que en los sistemas abiertos nunca se reproducen las mismas condiciones y, por lo tanto, nunca se recupera el punto de partida. Por este motivo, preferimos utilizar el término realimentación en lugar del de retroalimentación.

Los bucles de realimentación permiten dos tipos de regulación, que responden a dos principios de los sistemas dinámicos: la estabilidad y la adaptabilidad. La primera consigue la persistencia de condiciones a pesar de los cambios del entorno (realimentación negativa) y la segunda permite al sistema ajustarse a los cambios de condiciones internas y externas (realimentación positiva). Estos bucles de realimentación positivos permitirán el refuerzo y amplificación de las respuestas. La interacción de bucles de realimentación negativos y positivos forma unas complejas redes que determinan el comportamiento no lineal que caracteriza a los seres vivos (Capra, 1996). Las relaciones entre las variables que se establecen en este tipo de redes son diferentes de las que se plantean en el modelo tradicional de ciencia y poseen unas propiedades particulares que nos ayudan a comprender mejor las diferentes manifestaciones del comportamiento humano (Kelso, 1999), como se explicará extensamente en los siguientes apartados.

Debido a estas complejas redes, las relaciones lineales pierden su sentido. La interacción entre las partes y el medio, y por lo tanto las diferentes causas y estímulos, podrá provocar que una pequeña causa resulte en un gran efecto, una gran causa en un pequeño efecto, las mismas causas en los mismos efectos, que sin causas aparentes haya efectos o viceversa o, por qué no, que se produzcan las relaciones denominadas anteriormente como

lineales. Ello no quiere decir que su comportamiento esté definido por un caos (usando la acepción no técnica del término) y desorden total, sino que presentan unos patrones de orden subyacentes que no han podido ser estudiados hasta recientemente (Prigogine, 1993).

Si consideramos que los fenómenos naturales que actúan de forma lineal son escasos y que sus propiedades sólo son válidas en los sistemas dinámicos estables, que constituyen sólo casos excepcionales (a pesar de haber sido durante años los únicos estudiados) en la naturaleza, entenderemos la importancia de esta perspectiva para el avance de la ciencia.

Para la ciencia de la actividad física y el deporte, la TSD permite introducir nuevos conceptos que podrán ayudar a evolucionar y a entender fenómenos considerados hasta el momento inexplicables. De hecho, estas corrientes ya han influido en la teoría del entrenamiento, especialmente en la explicación de los procesos de adaptación progresivos que sufren los deportistas a lo largo del proceso (García Manso, 1997). García Manso (1999) enfatiza la necesidad de considerar el gesto deportivo en un sentido más amplio al que representa el componente biofísico del movimiento. Así mismo, Siff y Verchoshansky (2000) citan el excesivo determinismo que domina la teoría del entrenamiento clásico, y señalan la importancia de tener en cuenta la complejidad de los fenómenos relacionados con cualquier sistema biológico. Según estos autores, la adopción de métodos no lineales de investigación, como los que provienen de la teoría del caos, pueden explicar los cambios de estado repentinos beneficiosos o perjudiciales en la adaptación, como la supercompensación o las lesiones musculares. Además, según los autores, el investigar las condiciones que favorezcan la autoorganización es directamente aplicable a la búsqueda de la excelencia deportiva. Con el fin de minimizar la dependencia del determinismo clásico, Siff enfatiza la necesidad en el entrenamiento de individualizar, de considerar el estilo propio de cada individuo sin hacer hincapié en un modelo ideal, de

diversificar, respetar la asimetría, los efectos retardados y la interactividad de los procesos.

Estas propuestas y reflexiones eminentemente teóricas reclaman una investigación empírica que ya se ha iniciado profundamente en el área del aprendizaje motor, pero que es todavía exigua e insuficiente en el área del entrenamiento deportivo.

3- Implicaciones en el método de investigación

Desde la aparición de las teorías de la complejidad y de los sistemas no lineales, sistemas o acontecimientos que hasta el momento se creían incomprensibles o aleatorios se han llegado a considerar “predecibles” hasta cierto punto. Sus principios se han aplicado a multitud de ramas del conocimiento, tales como las matemáticas, la física, la biología, o incluso la economía o la psicología, a la vez que han aparecido diferentes ramas relacionadas con éstas.

La ciencia clásica optó por obviar aquellos sistemas que no presentan una actitud lineal y prefirió explicar todos los fenómenos como suma de diferentes relaciones de causalidad. Cuando demasiadas variables intervenían en un mismo suceso, éste se consideró imposible de estudiar por la infinidad de cálculos a realizar. Al papel del azar o al comportamiento aleatorio se le atribuyeron multitud de fenómenos para los que no se había podido encontrar una explicación satisfactoria desde el modelo determinista.

Gracias a la nueva perspectiva, muchas afirmaciones incuestionables hasta el momento se han puesto en duda, y el modelo clásico de investigación no ha sido una excepción. Diferentes proposiciones relacionadas con el ser humano han surgido de la psicología o la biomecánica, y ya en la actividad física se han realizado investigaciones aplicando los principios de estas novedosas teorías.

3.1- Limitaciones de la ciencia clásica

La investigación en nuestro ámbito se ha basado tradicionalmente en la ciencia clásica, tal y como ha sucedido en todos los otros campos de la investigación, que evolucionan gracias a los conceptos que aportan la física y las matemáticas. Esta ciencia es sistemática, al identificar variables y evaluar la relación entre estas variables; empírica, basada en la utilización de datos; reductiva, generaliza a partir de la observación de unos hechos observados en una pequeña muestra; replicable, ya que si se reproduce el proceso se deben obtener los mismos resultados; y lógica, los procedimientos que se siguen están en armonía con los objetivos que se persiguen (Thomas y Nelson, 1990). Está muy influenciada por la aceptación de la relación lineal de la causa y el efecto, o lo que es lo mismo, de las variables predictoras con las variables de desenlace.

Según Gleick (Gleick, 1987), debido a la linealidad universalmente aceptada, la ciencia se ha basado en los siguientes enunciados:

- “Los sistemas simples se comportan de manera simple”: Mientras estos sistemas puedan reducirse a unas pocas leyes, bien entendidas y totalmente deterministas, su conducta a largo plazo será estable y predecible.
- “El comportamiento complejo implica causas complejas”: Cualquier sistema visiblemente inestable, impredecible o anárquico, tiene que obedecer a multitud de componentes independientes o estar sometido a influencias externas esclavas del azar.
- “Sistemas de diferente naturaleza se comportan de manera distinta”: Cada disciplina acepta que sus componentes son diferentes y que por lo tanto son diferentes los sistemas

implicados, consistentes en miles de millones de esos componentes.

Si estos principios fueran correctos, podríamos predecir siempre los resultados de una sesión de entrenamiento o de un proceso de aprendizaje en todos los sujetos y deberíamos aceptar que las variaciones de estas predicciones serían fruto del azar. También deberíamos rechazar modelos de comportamiento que pertenezcan a sistemas diferentes a nuestro objeto de estudio porque estarán regidos por leyes completamente diferentes a las nuestras.

El modelo determinista puro aplicado a las ciencias que tienen como objeto de estudio el ser humano presenta muchas limitaciones. Ello es debido a la multitud de causas y efectos que se interrelacionan, lo que nos obliga a recurrir a la probabilidad porque desconocemos una buena parte de los componentes de una causa. Es imposible tener en cuenta todas las variables que actúan sobre un sistema, y cada sistema es diferente a otro, ya que no hay dos organismos iguales, como tampoco hay dos situaciones iguales. No siempre será válido escoger una n grande y considerar las desigualdades como desviaciones estándar o errores de observación. No se puede generalizar necesariamente de los hechos obtenidos por una pequeña muestra, de la misma forma que no se puede esperar que esa muestra se comporte exactamente de la misma manera si se repite la investigación. Cada situación es diferente a la anterior, al menos en alguna de sus variables, y la dependencia sensible a las condiciones iniciales puede provocar grandes diferencias en el resultado final. La ciencia clásica acepta estas desviaciones como errores o como ruido, mientras que los investigadores que defienden las teorías no lineales encuentran patrones de organización en los datos con “ruido” gracias al nuevo paradigma. De hecho, el origen y la función de la variabilidad será un aspecto central para entender cualquier proceso de cambio.

La variabilidad nos revela cuando un sistema está en transición, y las diferencias individuales delatarán las posibles trayectorias que cada uno puede adoptar en el espacio abstracto en el que se desenvuelve. A su vez, las similitudes entre individuos indicarán las limitaciones existentes. Desde una perspectiva más dinámica, no se desecharán estudios por no presentar efectos estadísticamente significativos, y la variabilidad entre los datos será una información valiosa (Thelen y Smith, 1998). El ruido no siempre será lo que tradicionalmente se entiende por este concepto, sino que a menudo la filtración de datos para desecharlo esconde el comportamiento no lineal del sistema que se estudia.

Según Gregson (1988), cuando se presentan desigualdades, en vez de entenderlas como simples desviaciones estándar, hay más opciones, como hacer la teoría más complicada, desecharla, o empezar con otra teoría y mostrar como hechos extraños suceden de forma que pueden llegar a ser explicables hasta un límite.

Nos encontramos probablemente frente al reto de conseguir que la investigación en las ciencias de la actividad física y el deporte se adapte también a un cambio de paradigma, que permita responder más satisfactoriamente a las cuestiones que se plantean desde su ámbito.

3.2- La TSD y su aplicación en la investigación

La TSD ha sido introducida recientemente en numerosos campos como marco para explicar determinados fenómenos obviados hasta el momento por la imposibilidad de su estudio.

Sabemos que cada organismo se desarrolla de forma distinta, incluso si aparentemente está sometido a las mismas variables, y queremos creer que estas diferencias responden a algo identificable. Al observar que sistemas de

tipos muy distintos siguen patrones similares, el nuevo paradigma estudiará los patrones de cambio de estos sistemas dinámicos no lineales.

Desde esta perspectiva la predicción exacta de las respuestas se hace prácticamente imposible, a pesar de que las ecuaciones que se utilicen sean puramente deterministas. Se produce pues en el contexto de los sistemas dinámicos un cambio de énfasis del análisis cuantitativo al cualitativo.

Entre otras consecuencias, la dinámica no lineal permite comprender que una misma causa pueda tener diferentes efectos, diferentes causas un mismo efecto o un efecto pueda actuar sobre su causa. Permite también dar explicación a algunos de los hasta ahora considerados “inexplicables” o paradójicos fenómenos que observamos aplicando los métodos tradicionales de investigación.

Otra aportación que podría modificar las conclusiones de muchos estudios será el entender la variabilidad y las fluctuaciones de las respuestas no como errores sino como cambios necesarios en los sistemas biológicos para su adaptación al medio (cambiante a su vez).

A pesar de que en el campo de la actividad física ya numerosas teorías aceptan la importancia de la totalidad, especialmente a partir de la aparición de la teoría general de sistemas (Bertalanffy, 1976), no se acaba de tener en cuenta en algunas ramas. Éste es el caso del entrenamiento, en el que predominan aún los métodos analíticos que dividen al cuerpo en partes (incluyendo también la separación cuerpo-mente). El mismo problema se observa en el campo de la investigación, que establece relaciones causales entre las variables teniendo únicamente en cuenta una parte de todos los factores que pueden influir.

Hasta el momento, uno de los métodos de referencia en la investigación aplicada al campo de la actividad física y el deporte ha sido, como en otras ciencias, el método experimental, que permite determinar alguna forma de

causalidad apoyándose en métodos estadísticos. Pero el progreso alcanzado ha promovido la necesidad de analizar los fenómenos con una mayor sensibilidad, teniendo en cuenta aspectos clave como la globalidad de las respuestas. La TSD nos hace dudar también sobre el uso del método experimental tradicional como el único camino para conocer el funcionamiento de los cambios de nuestro organismo, y reclama una reflexión acerca de la búsqueda de otros modelos que permitan incluir la individualidad de las respuestas y la interacción de multitud de variables que se comportan dinámicamente, es decir, que cambian con el paso del tiempo. Los tradicionales estudios de grupos comparan el comportamiento de una construcción estadística, la media del grupo, pero no del individuo en sí. La unidad de análisis deja de ser la persona para pasar a ser el grupo, a no ser que se muestre que cada sujeto de esa muestra se comporta del mismo modo que la media (Bouffard, 1993). Un método tradicional de investigación que respeta la individualidad es el de los estudios de casos, bastante frecuente en medicina. Se defiende este tipo de estudios por la poca relevancia que tendrá para un sujeto los resultados de una gran muestra que sea muy adecuada con relación al principio de aleatoriedad. Si un investigador puede generalizar de una manera lógica a partir de sujetos cuyos resultados o características están bien especificadas como parte de un grupo homogéneo, entonces también se podrá generalizar lógicamente a partir de un solo individuo cuya respuesta y características estén bien especificadas. Para aumentar la base para la generalización a partir de un experimento de caso único, se propone la repetición del mismo experimento varias veces a sujetos similares, y para aumentar la fiabilidad se propone repetirlo al mismo sujeto. La consistencia de los resultados en más de un sujeto permite formular conclusiones favorables acerca de la eficacia general de este procedimiento (Smith, 1988; Barlow y Hersen, 1984). No obstante, se suelen plantear inconvenientes de estos diseños, aunque no son más que la consecuencia de la importancia de tener en cuenta aspectos como las diferencias individuales o las variaciones en las variables que actúan.

En el campo de la psicología del deporte también se ha cuestionado el tipo de investigación realizada y se alude a la necesidad de buscar un nuevo paradigma para poder abordar la complejidad del comportamiento del atleta, considerándolo de forma global (Riera, 1985; Riera y Cruz, 1991).

A pesar de las limitaciones de los modelos de investigación basados en relaciones causales y en sistemas lineales deterministas, no se pretende aquí desechar el modelo tradicional de ciencia, sino limitarlo adecuadamente. Tal y como afirma Feyerabend (1975) “una ciencia que insista en poseer el único método correcto y los únicos resultados aceptables es una ideología”. Únicamente se pretende enfatizar sobre la necesidad de tener en cuenta otros paradigmas y encontrar nuevas formas de investigación que nos permitan abordar aquellas cuestiones para las que aún no encontramos una explicación satisfactoria y que, en algunos casos, ya se llevan a la práctica. Y es que en las ciencias del entrenamiento, por su naturaleza esencialmente práctica y aplicada, los cambios cualitativos en las teorías o paradigmas que las interpretan se producen retardadamente.

3.3- Variables e instrumentos de análisis aplicados en la investigación deportiva a partir de la expansión de las aplicaciones de la TSD

La concepción del ser humano como un sistema dinámico complejo requiere utilizar una nueva metodología de análisis y valoración. Si la investigación clásica suele centrarse en el análisis de parámetros discretos y en la captación de estados, en el nuevo paradigma se requerirá el estudio de parámetros continuos y de los cambios. Las series temporales serán el parámetro más utilizado y se centrará así el estudio en el proceso más que en los resultados puntuales.

Los movimientos se consideran procesos que dependen del tiempo, y por lo tanto pueden modelarse teniendo en cuenta las series temporales de las diferentes coordenadas que participan. Por ejemplo, cada articulación posee unas coordenadas geométricas, y el conjunto de las coordenadas de las articulaciones relevantes construye una configuración de altas dimensiones. Estos movimientos diferirán interindividualmente e intraindividualmente en función del tipo de actividad que se realice y el contexto en el que se lleve a cabo. La TSD nos proporciona herramientas para analizar estos movimientos al permitir poder expresar teóricamente el comportamiento del sistema neuromuscular en bajas dimensiones (por ejemplo con una variable). Estas herramientas definirán qué variables biomecánicas son las más adecuadas para capturar la organización de todo el sistema neuromuscular (Kurz y Stergiou, 2004).

Las series temporales se podrán analizar aisladamente o relacionándolas con otras. Un ejemplo del estudio de estas relaciones que se está empezando a extender en la investigación deportiva es el análisis de las fases relativas. Tal y como se explicará ampliamente en las aplicaciones de la TSD en el estudio de la coordinación, se ha estudiado como se relacionan las series temporales del movimiento de diferentes partes del organismo o de diferentes organismos. También se ha aplicado a la investigación en los deportes de oposición, y, en lugar de estudiar los desplazamientos de cada jugador, se estudian las interacciones entre los oponentes, reduciendo así las dimensiones del sistema a estudiar (Hughes et al., 1998; Lames, 2004; Palut, 2003). La principal aportación de las fases relativas es que nos proporcionan información de cuatro variables (desplazamiento y velocidad de dos sistemas distintos) en una sola medida (Kurz y Stergiou, 2004).

También se han introducido nuevos instrumentos de análisis para poder analizar la no linealidad de series temporales o las interrelaciones entre las diferentes variables de los estudios. Algunos ejemplos de estos instrumentos pueden ser los siguientes:

- Redes neuronales para el análisis de patrones de movimiento
- Modelos dinámicos que interpretan la relación no lineal entre la carga y el rendimiento.

Las redes neuronales artificiales (ANNs) son técnicas de computación que permiten almacenar conocimiento experimental y posibilitar su aplicación (Schöllhorn, 2004). Este conocimiento se adquiere mediante una red que es capaz de aprender y reconocer patrones individuales, y puede por ello analizar series temporales. Un tipo concreto de redes neuronales utilizadas en la investigación sobre el movimiento humano son los Kohonen Feature Map (KFM), que reconoce patrones simples como miembros de clusters (Perl, 2004a). Los KFM describen relaciones topológicas entre las neuronas, lo que puede utilizarse para identificar grupos de patrones de movimiento similares. Schöllhorn y Bauer (1998) identifican patrones individuales de lanzamiento de peso analizando 200 ms de la acción mediante esta herramienta de análisis. El mismo autor también agrupa diferentes patrones de locomoción en función de la altura de los tacones que llevan los sujetos de estudio (Schöllhorn et al., 2002).

Otro tipo de redes neuronales utilizadas en la investigación motriz es el de las redes controladas dinámicamente o DyCon (tipo de KFM), que tienen la ventaja de necesitar una menor cantidad de datos originales para entrenarlas (Perl, 2004a). Cada neurona de esta red contiene una memoria interna y un algoritmo autocontrolado, originariamente desarrollado por el autor para modelar procesos de adaptación fisiológicos, que ayuda a modelar y analizar procesos de aprendizaje. Dycon no tendrá un estado final, sino que será capaz de adaptar su memoria interna a los nuevos inputs.

En cuanto a los modelos dinámicos, dedicamos un apartado especial a un modelo creado especialmente para la investigación deportiva y que se utilizará en la parte empírica de esta tesis.

3.3.1 - El PerPot metamodel

El PerPot metamodel (Perl, 2004b) es un metamodelo que describe la dinámica no lineal de la interacción entre cualquier tipo de carga con el rendimiento mediante el uso de flujos retardados entre potenciales teniendo en cuenta que el input introducido por la carga produce simultáneamente un potencial de estrés y un potencial de respuesta. Ambos influyen en el potencial de rendimiento de forma antagonista (incrementándose cuando el otro se reduce) pero con diferentes retardos en su aparición (véase fig. 4).

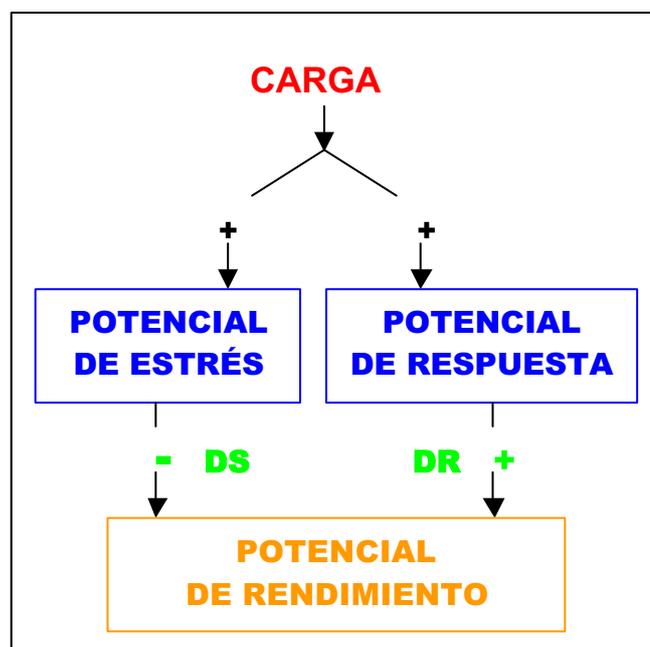


Fig. 4 Estructura del PerPot. DS: Delay of Strain o retardo de estrés; DR: Delay of response o retardo de respuesta

La relación entre los tres potenciales depende del lapso de tiempo (DS - retardo de estrés-, DR -retardo de respuesta-) que transcurre entre el estímulo y la respuesta, del tiempo que requiere la carga para que se aprecie el efecto en el rendimiento externamente. Estos retardos caracterizarán la dinámica de la interacción. Si los retardos son iguales, uno compensará al otro y el rendimiento se mantendrá constante. En cambio, si

la relación entre los dos es distinta se puede dar el proceso de supercompensación (si el retardo de la respuesta es más grande que el del estrés) o no producirse (si el retardo de la respuesta es menor que el de estrés). El otro hecho destacable es que si la carga es excesivamente alta se puede llegar a un estado de colapso, o de sobreentrenamiento. Este efecto es modelado por el PerPot limitando la capacidad de los potenciales. Si el potencial de estrés sobrepasa este límite, se produce un efecto de sobrecarga, y se reduce el potencial de rendimiento. Por ello se introduce la función de reserva, que indicará si el sistema se aproxima a un estado de colapso (véase fig. 5).

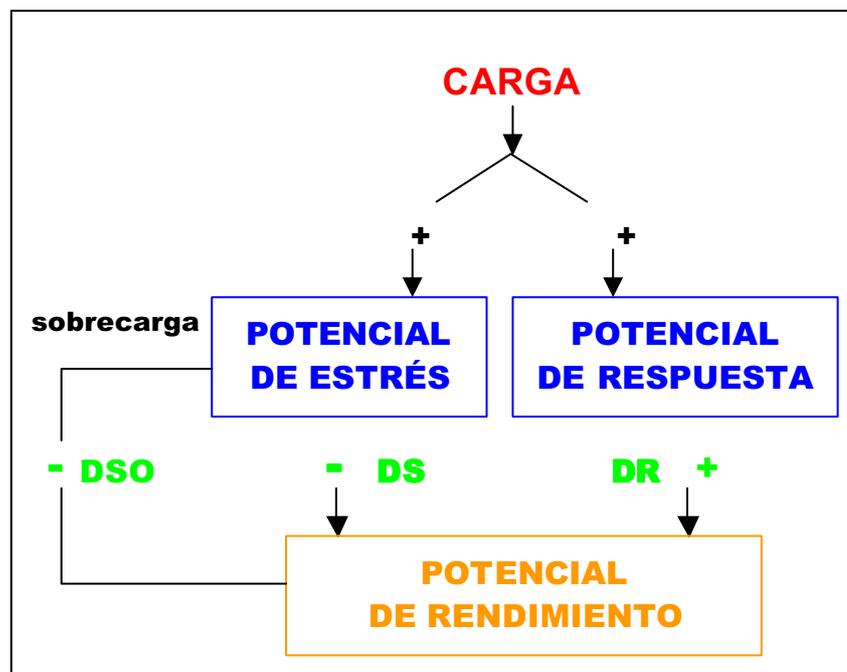


Fig. 5 PerPot completado por el componente de sobrecarga (DSO: retardo del estrés con sobrecarga; DS: retardo del estrés; DR: retardo de la respuesta).

En la figura 6 aparece el software que permite analizar la interacción entre la carga y el rendimiento, en donde se deben introducir los datos de carga y de rendimiento de estas dos variables. Una vez introducidos, no se conocerán los parámetros de los retardos del sistema, ya que estos serán individuales para cada tipo de carga y de sistema, pero el metamodelo encontrará la

relación existente entre ellos aunque no se conozcan los valores absolutos. Al obtener este dato, se observará cual de ellos es más grande y si el sujeto se puede aproximar a una situación de colapso. Sin un análisis de este tipo, puede suceder que confundamos un aumento en el rendimiento que sucede simultáneamente al aumento de la carga con una consecuencia de esta carga, cuando en realidad es producto de las cargas anteriores y esta última puede llevar a estados de sobreentrenamiento.

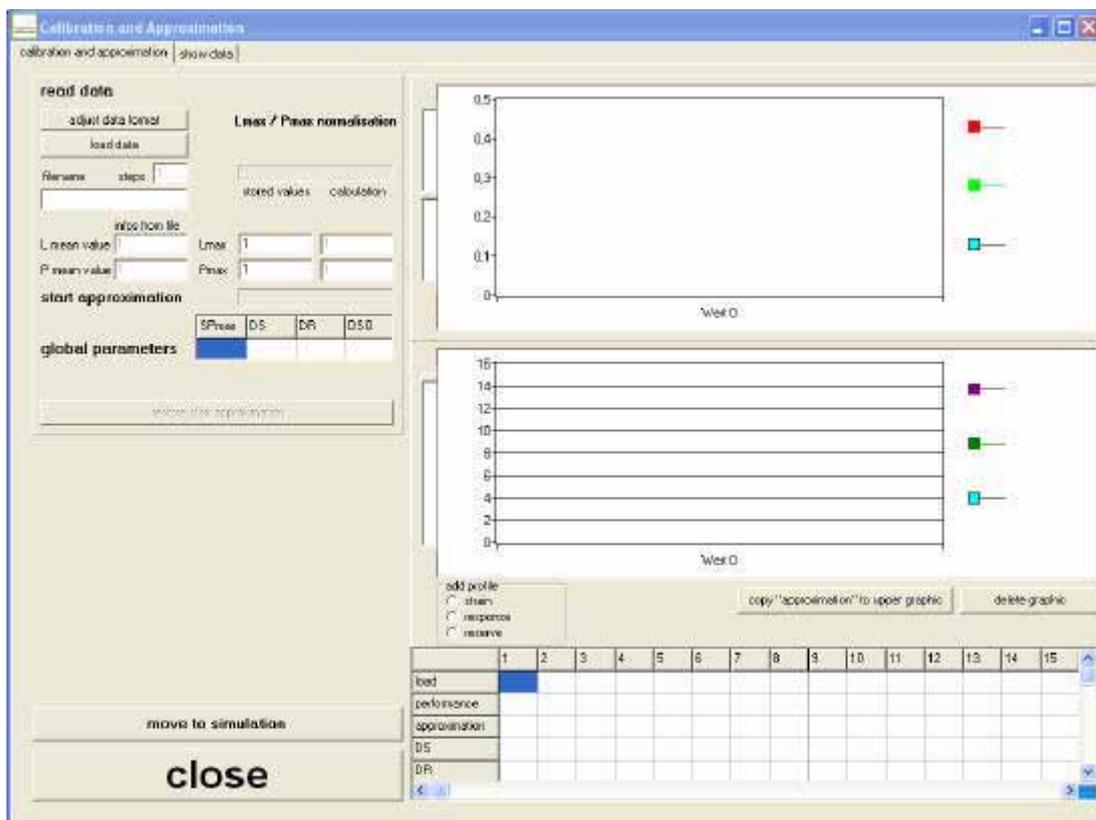


Fig. 6 Software del PerPot en donde se introducen los datos de carga y rendimiento.

La otra función interesante del PerPot es que es capaz de optimizar el perfil de carga introducido para modificar posteriores programas de entrenamiento. Para ello utiliza un algoritmo genético (GA). Éste se basa en una selección de la mejor solución, ya que se generan todas las posibles, se combinan, y se selecciona la que produce un mayor perfil de rendimiento.

En el gráfico inferior de la figura 7 aparece un ejemplo de un perfil de carga y de rendimiento. En el gráfico superior aparece el efecto del GA, disminuyendo la carga (en un 33%) y aumentando el perfil de reserva, evitando el colapso que se observa en el gráfico inferior en el paso 6. Diferentes estudios han utilizado el PerPot metamodel para analizar procesos de distintos parámetros fisiológicos, obteniendo interesantes resultados (Mester et al., 2000).

El hecho de que esta herramienta tenga en cuenta estos conceptos fisiológicos nos permitirá utilizarla en el primer estudio de la parte empírica en el que habrá tres periodos distintos de entrenamiento, ya que los efectos de un periodo sobre otro se podrán tener en cuenta.

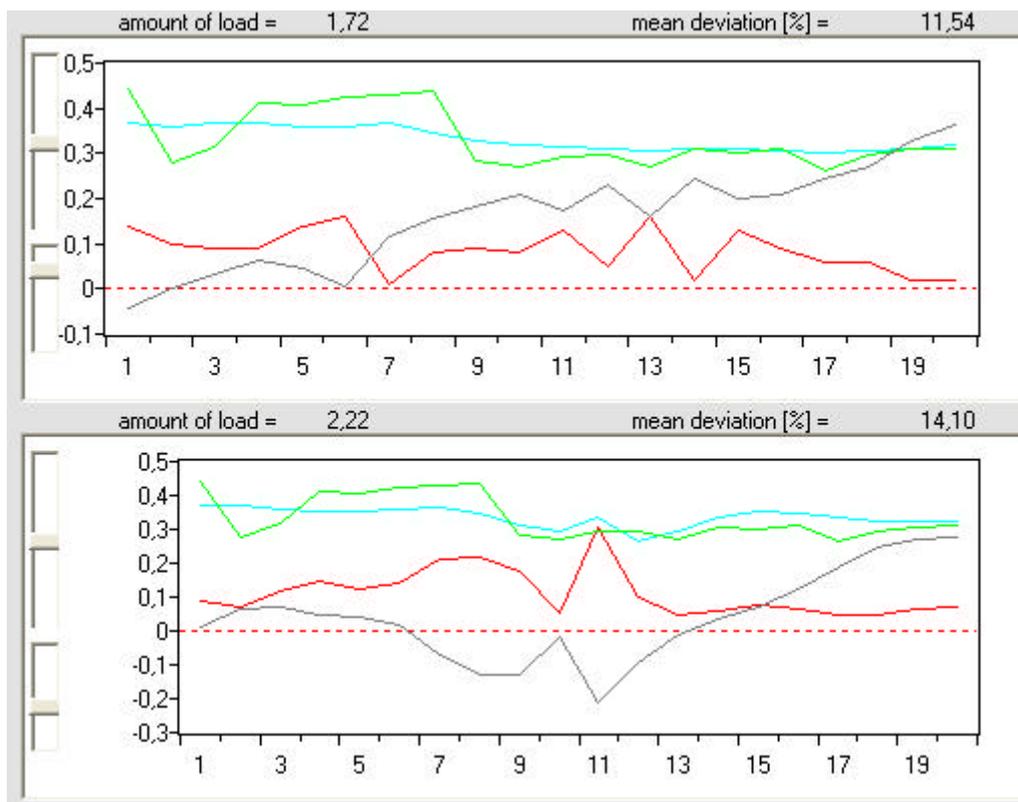


Fig. 7 Efecto del GA sobre un ejemplo de interacción entre carga y rendimiento. En el gráfico inferior se observa en rojo el perfil de la carga, en verde el perfil del rendimiento, en azul el perfil de la aproximación que realiza el PerPot, y en negro el perfil de reserva. Entre el paso 6 y el 14, el PerPot detecta un exceso de carga acompañado de una disminución del rendimiento y por tanto un peligro de sobreentrenamiento. En el gráfico superior se observa el efecto del GA, que propone una disminución del 33% de la carga.

4- Aproximación conceptual a la TSD

La aplicación de esta perspectiva, debido a su origen en las matemáticas y la física, provoca la utilización de conceptos y herramientas que pueden resultar poco familiares para los investigadores de las ciencias de la actividad física y el deporte. Por ello se explican a continuación los conceptos y principios más fundamentales que han sido aplicados en el estudio del movimiento humano. Éstos permitirán justificar la individualidad, la dependencia sensible a las condiciones iniciales, el sinergismo funcional o la interacción entre todos los elementos del organismo. No obstante, no se dará una perspectiva matemática de la coordinación humana, pero sí que se utilizarán sus conceptos y herramientas, ya que consideramos de gran importancia tenerlos en cuenta en todas aquellas ciencias en las que el ser humano sea el objeto de estudio, como es el caso de las ciencias de la actividad física y el deporte.

4.1- Sistema dinámico

Desde el punto de vista formal y matemático, se considera un sistema como una entidad formada por un conjunto de elementos, que son los componentes básicos del sistema, y por las relaciones existentes entre sí y con su entorno. Matemáticamente, se intenta establecer las ecuaciones que gobiernan las interacciones entre los elementos del sistema, creando así un modelo matemático de éste.

El sistema evolucionará a lo largo del tiempo, y sus variables x_i variarán, pudiendo ser expresada la variación de la magnitud matemáticamente por una derivada con relación al tiempo dx_i/dt :

$$dx_i/dt = f_i(x)$$

Expresión válida para cada una de las x . El conjunto de las n ecuaciones diferenciales se podrá denominar sistema dinámico (Aracil, 1986).

4.2- Espacio de fases o espacio de estados y la relación fase

La teoría geométrica que desarrolló Poincaré de los sistemas dinámicos describirá, al modelizar el sistema observado, los conceptos más fundamentales que se aplicarán posteriormente, como es el caso del **espacio de estados, el espacio de fases** o los **atractores** del sistema dinámico (Abraham y Shaw, 1992). El rango de valores que pueden adquirir las diferentes variables del sistema será el espacio de estados (espacio abstracto donde se pueden representar todas las variables de un sistema complejo con todas las posibles combinaciones de valores). Cuando este espacio de estados se interpreta geoméricamente, los cambios de estado se pueden representar como movimientos de un punto a lo largo de la “superficie” de este espacio. El espacio de fases será la representación del comportamiento del sistema dinámico en el espacio de estados (Stergiou et al. 2004). Es una herramienta muy útil puesto que permite analizar de un solo vistazo toda la dinámica del sistema. La ecuación diferencial nos dirá, para cada punto del espacio estado, qué dirección adoptará el sistema y a qué velocidad en un intervalo de tiempo infinitesimal. Dentro del espacio de fases se producirá una relación entre los diferentes componentes que se denominará **relación de fases**.

El ejemplo más simple será un modelo de un parámetro o una variable, por ejemplo que represente la evolución de la concentración de lactato en sangre de un atleta. En la figura 8 se presenta el modelo geométrico de

todos los estados posibles del sistema, y en la figura 9 está representada gráficamente la serie temporal de la evolución de esa variable.

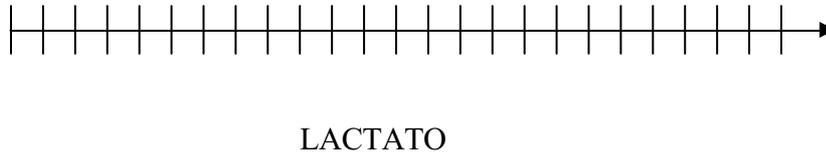


Fig. 8 Modelo geométrico de todos los estados posibles del sistema con relación a la concentración de lactato en sangre

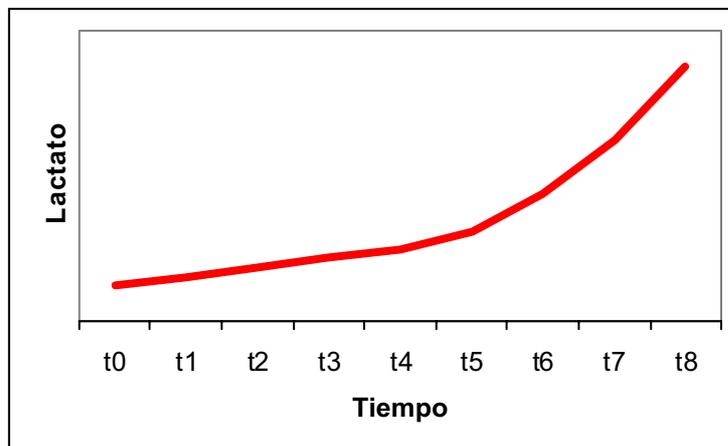


Fig. 9 Serie temporal de la concentración de lactato en sangre. El eje vertical representa el espacio de estados, y el eje horizontal el tiempo.

4.3- La trayectoria del sistema

Si el sistema se describe con dos variables, el espacio de estados tendrá dos dimensiones, será un plano, y los cambios se representarán como curvas en ese espacio. Esta curva será la **trayectoria** del sistema y el seguimiento de ésta dará la evolución del sistema. En la figura 10 se observa la relación de la concentración de lactato en sangre de un atleta con su frecuencia cardiaca. Las dimensiones del espacio aumentarán de forma proporcional al número de variables que se escojan para definir el sistema.

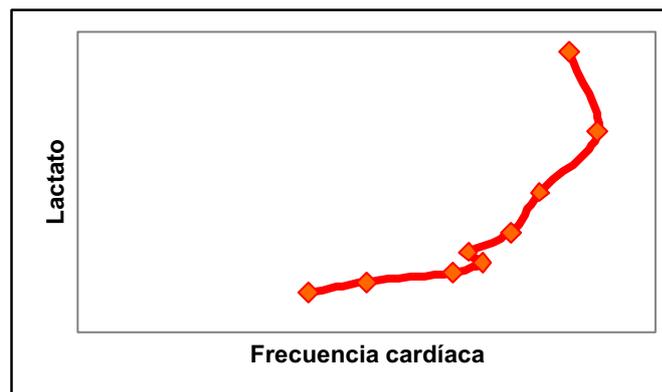


Fig. 10 Plano que representa la relación entre la frecuencia cardíaca y la concentración de lactato en sangre en diferentes momentos del tiempo

Las trayectorias describen así el comportamiento del sistema en un intervalo de tiempo, y la teoría de los sistemas dinámicos intentará predecir estas trayectorias de forma cualitativa. En sistemas lineales se podrá predecir cuantitativamente, pero en la mayoría de problemas de dinámica aplicada las predicciones cuantitativas son imposibles (Abraham y Shaw, 1992).

4.4- Los atractores puntuales y de ciclo límite

Para poder predecir cualitativamente, el concepto de atractor se vuelve imprescindible. Será el punto fijo que atraerá la trayectoria en los sistemas disipativos debido a que el volumen del espacio decrece y un lugar es preferido con relación a los otros. El atractor incluirá los estados del sistema hacia los que tiende, el límite, y representará el comportamiento de un sistema en equilibrio dinámico, después de que hayan desaparecido las transiciones (Hayles, 1998).

En matemáticas se describen diferentes tipos de equilibrio, y se pueden representar gráficamente imaginando un cuenco con una bola en el centro (véase fig. 11), un cuenco potencial. La bola permanecerá en reposo en ese punto, y si la movemos un poco, de inmediato regresa a su posición de

equilibrio, que será estable. Pero si movemos esta misma bola sobre una mesa horizontal, se quedará en reposo en una nueva posición, ejemplo de equilibrio indiferente. Si colocamos ahora la bola en la posición más alta del cuenco, estando éste en posición invertida, la bola estará nuevamente en equilibrio, pero a poco que se desplace caerá por la pared del cuenco, ya que estará en un equilibrio inestable (Haken, 1994).

Si observamos un péndulo real sometido a la fricción del aire, su atractor será la posición vertical hacia abajo, al que llegará más tarde o más temprano sin importar la posición desde la cual haya empezado el movimiento oscilatorio. Éste será un ejemplo de **atractor puntual**. En la figura 12 se representa un sistema dinámico con un atractor puntual en un espacio de dos dimensiones, también denominado atractor estático porque representa un equilibrio estático. El atractor además puede ser un **ciclo límite**, tal y como se representa en la figura 13, también denominado **atractor periódico** porque representa un equilibrio periódico. Por ejemplo, un péndulo que oscila regularmente, a pesar de los efectos de la fricción y la resistencia del aire, debido a mecanismos eléctricos. El péndulo no está atraído hacia un punto fijo, sino que es impulsado hacia una senda cíclica en el espacio fase, llamada ciclo límite. Los ciclos límites tienen la aptitud para resistir el cambio mediante la retroalimentación.

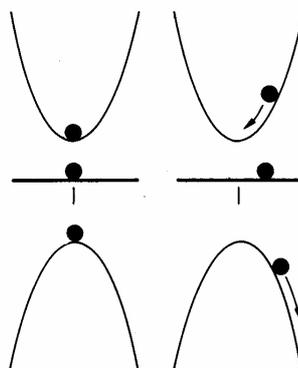


Fig. 11 Bola colocada en un bol en posición de equilibrio estable. Si se mueve vuelve de inmediato a la posición de equilibrio. En el plano, en cambio, si se mueve se queda en equilibrio en la nueva posición. En el cuenco invertido, el equilibrio es inestable puesto que al moverla la bola cae por la pared del cuenco (Haken, 1994).

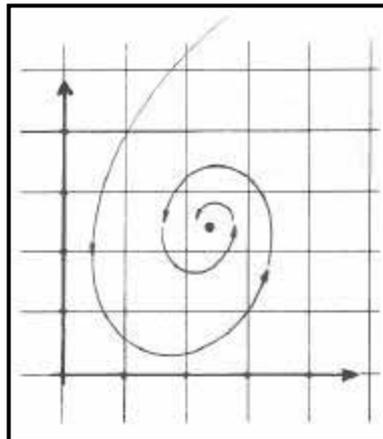


Fig. 12 El punto del centro es un atractor puntual en un espacio de dos dimensiones. Hay una zona circular en la que cualquier trayectoria que se inicie dentro de ella finalizará en el punto, en el atractor estático (Abraham y Shaw, 1992).

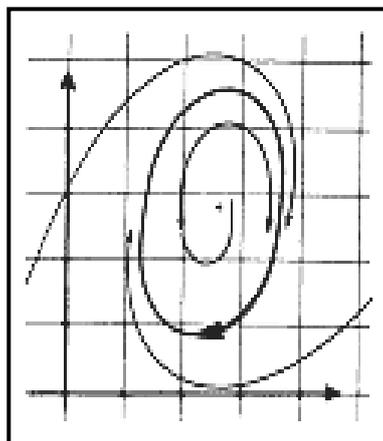


Fig. 13 El círculo cerrado será un atractor de ciclo límite. A excepción del punto central, cualquier estado inicial evolucionará hacia el ciclo límite, hacia el atractor periódico.

En el campo de la coordinación motriz y en el desarrollo motor, tal y como se explicará posteriormente, se destaca la importancia de la presencia de los atractores en el espacio estado en el que se desenvuelve el sistema (Kelso, 1999; Thelen et al., 1993; 1996). Los sistemas dinámicos buscan modos de comportamiento preferidos en función de las interacciones entre sus componentes internos y la sensibilidad a las condiciones externas. No hay códigos ni programas, y bajo diferentes condiciones los componentes

pueden organizarse formando otros patrones estables. Los atractores pueden tener diferentes grados de estabilidad e inestabilidad, lo que se suele representar mediante los cuencos o las funciones potenciales. Las funciones potenciales representan las posibilidades energéticas del parámetro de orden, ilustrando sus atractores y la estabilidad de éstos, así como los cambios en los atractores al modificarse los parámetros. Existen configuraciones de movimiento y construcciones mentales tan estables, como el patrón locomotor de andar, que se necesitan perturbaciones muy importantes para desestabilizarlos.

La distribución de los atractores será única para cada organismo o sistema, y una pequeña diferencia, debido a la no-linealidad, puede provocar un proceso completamente diferente en un sistema o en otro. Esta dependencia sensible a las condiciones iniciales justifica la individualidad de las respuestas aunque a los sistemas se les aplique el mismo estímulo.

4.5- La cuenca del atractor y las separatrices

La zona en la cual cualquier estado inicial evolucionará hacia el atractor es denominada la **cuenca del atractor**. Generalmente, en el espacio de fases de cualquier sistema, hay más de un atractor con sus correspondientes cuencas, y las regiones de separación serán denominadas **separatrices** (véase fig. 14). De hecho, cualquier punto que no pertenezca a una cuenca de atracción pertenecerá a la separatriz por definición (Abraham y Shaw, 1992). Si seguimos con el ejemplo del péndulo sometido a la fricción del aire, y con el fin de visualizar el concepto de separatriz, podemos imaginar que existe un campo magnético que actúa atrayendo al péndulo a partir de una determinada posición de éste. Esta posición será la separatriz, puesto que si no llega a ella, el péndulo tenderá hacia la posición vertical, el atractor puntual; pero si sobrepasa este punto, el péndulo dejará de estar atraído por la posición vertical.

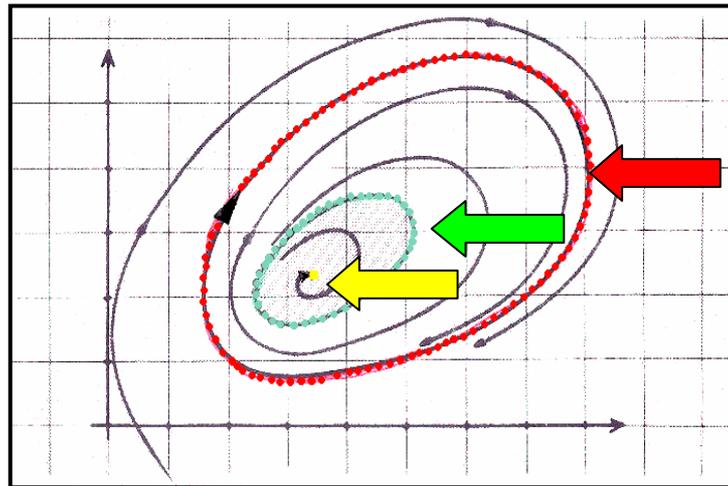


Fig. 14 Espacio de fases con dos atractores, uno puntual (flecha amarilla) y uno de ciclo límite (flecha roja). El círculo señalado con la flecha verde representa la separatriz (Adaptado de Abraham y Shaw, 1992).

4.6-Los repelentes

También puede haber puntos o ciclos límite que produzcan el efecto contrario de los atractores, y serán denominados **repelentes**. En la figura 15 se representa un repelente, así como diferentes tipos de atractores.

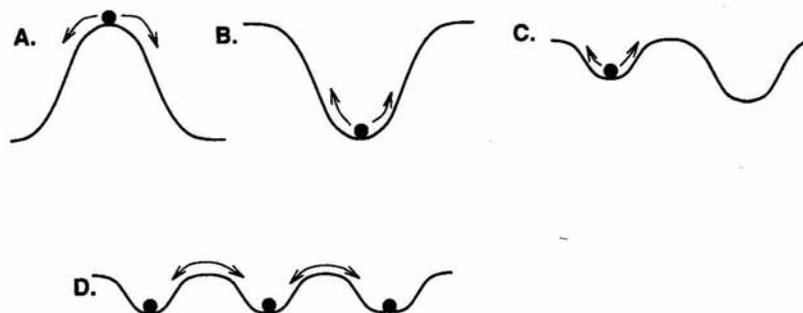


Fig. 15 A: la partícula en la cima tiene mucha energía potencial, y cualquier pequeña perturbación provocará que caiga, es un repelente. B: La partícula necesita una gran perturbación para que se vaya de la posición en la que está, es un atractor estable. C: atractor menos estable. Requerirá una pequeña perturbación para poder salir del estado en el que se encuentra, pero con suficiente tiempo lo más probable es que acabe en el cuenco más profundo, el más estable. D: Un sistema común que presenta multiestabilidad, muchas opciones casi-estables.

4.7- Los atractores caóticos

Además de los atractores puntuales y los ciclos límites, encontramos con frecuencia **atractores caóticos**. Éstos fueron descubiertos por Birkhoff en 1932 (Abraham y Shaw, 1992), pero el más famoso es el estudiado por uno de sus alumnos 31 años más tarde, Lorenz. Lorenz estudió las turbulencias de la atmósfera terrestre por la competencia entre las masas de aire calientes y frías observando un fenómeno similar al de las denominadas células de Bénard.

Las células de Bénard provienen del experimento de Rayleigh-Bénard en el que se provocó una inestabilidad y se mostró como el orden nace del caos. Al principio, al calentar una olla con líquido se produce un flujo de conducción regular. A partir de una determinada temperatura, se alcanza un estado alejado del equilibrio y se llega a un desorden total. Pero a más temperatura, el calor no se puede dispersar con suficiente rapidez sin ayuda de vastas corrientes de convección (aparece el orden). Así, el caos alejado del equilibrio contiene la posibilidad de autoorganizarse. El líquido caliente ascenderá, pero al entrar en contacto con las capas más frías, perderá calor. Se enfriará, se contraerá y perderá su tendencia a querer ascender. Además, el rozamiento de su entorno va frenando el movimiento ascendente. Pero a altas temperaturas sí que podrá subir y empezará el movimiento macroscópico ordenado, habrá surgido un movimiento colectivo no impuesto desde fuera sino autoorganizado (Haken, 1994) (véase fig. 16).

Lorenz simuló el modelo de este sistema en el ordenador y encontró un atractor caótico determinado, pero en el cual las trayectorias son impredecibles

Podemos seguir con el ejemplo de los péndulos para ilustrar el significado de atractor caótico. Si cogiésemos tres imanes, los pusiésemos sobre una superficie y posteriormente dejásemos oscilar un péndulo por encima de los imanes, observaríamos un extraño movimiento (véase fig. 17). Resultará

difícil realizar predicciones de este movimiento, ya que a veces éste se limitará a desplazarse alrededor de los imanes y otras se acercará a uno u a otro. Si marcásemos en un papel con colores diferentes cada posición desde la que se suelta el péndulo en función del imán en el que acaba concentrándose el movimiento, podríamos llegar a configurar imágenes como la que se muestra en la figura 18. En esta imagen se representa mediante una simulación por ordenador dicho fenómeno de caos determinista.

En los sistemas con atractores caóticos, cualquier pequeño error en la medida de la posición del sistema en un momento determinado conducirá a una total ignorancia de la posición de la trayectoria en momentos posteriores. Otro ejemplo gráfico sería el arrojar una piedra por un barranco abajo. La infinidad de variables que influirán en la trayectoria de la piedra nos llevará a la total ignorancia de su posición final, a pesar de que su movimiento esté determinado por las clásicas leyes de la física. Un milímetro de diferencia en la posición inicial podrá hacer, por ejemplo, que no toque otra piedra que está 10 cm más abajo, lo que producirá un cambio radical en su trayectoria.

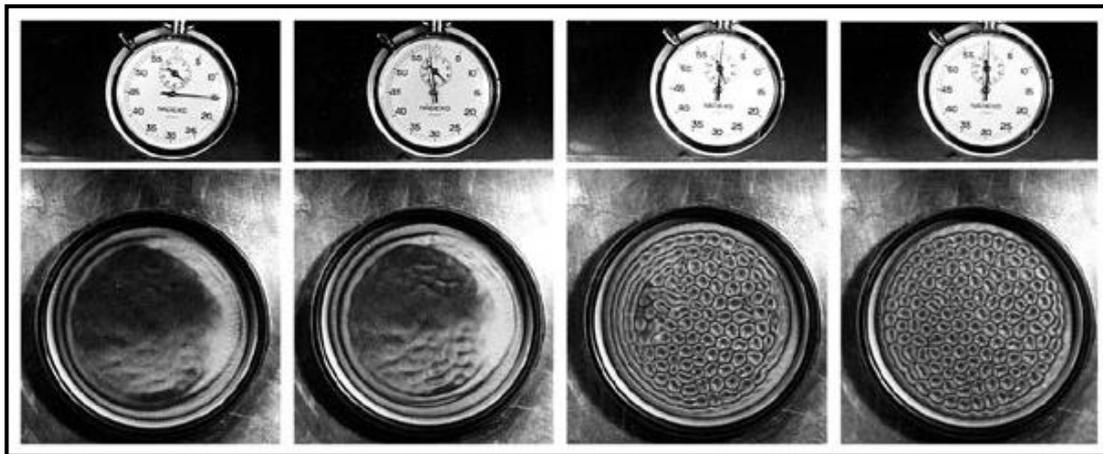
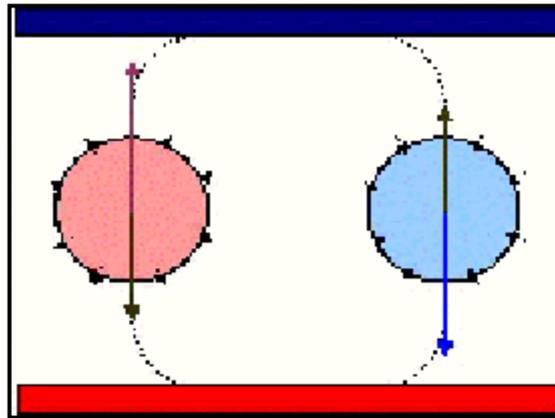


Fig. 16 Experimento de Rayleigh-Bénard: Cuando se calienta por su base un líquido, por ejemplo aceite de silicona o cualquier otro líquido viscoso, debido a la flotabilidad de Arquímedes o al efecto de la variación de la tensión superficial líquido-aire, o a la combinación simultánea de ambos mecanismos, el sistema evoluciona desde una situación homogénea (sin ordenar) autoorganizándose en celdas de diversas formas, por ejemplo hexagonales. En la figura superior se muestra la convección por la diferencia de temperatura. La figura inferior muestra la secuencia que permite ver cómo el sesgo debido a la presencia de la pared cilíndrica intenta producir una forma axisimétrica, pero al final la dinámica intrínseca del líquido domina induciendo el panel de abeja (García, 2002).

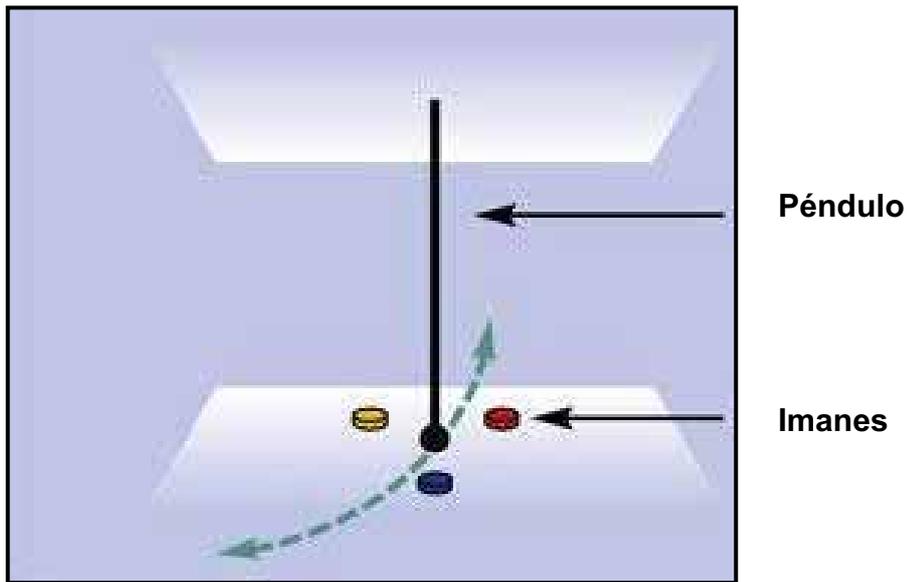


Fig. 17 Oscilación de un péndulo atraído por tres imanes (Navarro y Ros, 2002)

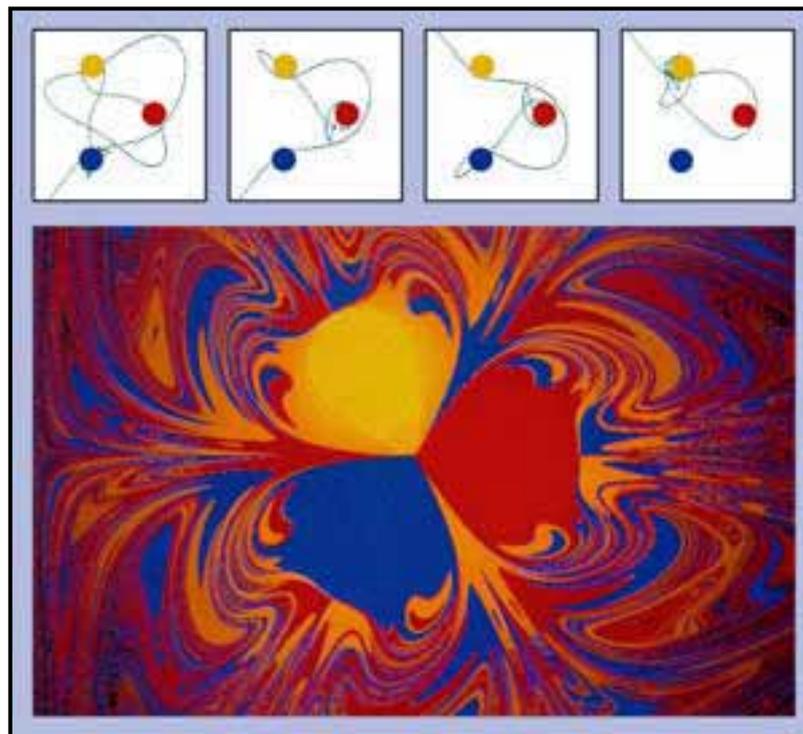


Fig. 18 Simulación por ordenador del fenómeno mostrado en la figura 14 (Navarro y Ros, 2002)

4.8- La autoorganización

Los sistemas vivos poseerán múltiples atractores en todos los niveles de análisis, y todos estarán inmersos en el denominado proceso de **autoorganización**.

La autoorganización es un término general para los procesos por los cuales surge el orden y la estructura, y explica cómo los modelos macroscópicos están formados del simple agregado de elementos microscópicos. Del mismo modo que el orden surge de los sistemas inanimados, también surgirá en los sistemas biológicos y sociales (Schmidt et al., 1999) o en cualquier otro sistema compuesto por numerosos componentes. Este hecho se producirá como consecuencia de interacciones energéticas entre las condiciones externas e internas sin que exista a priori una orden específica de una “parte” del sistema que jerárquicamente sea superior o del exterior. Una definición más precisa nos dice que la autoorganización es la formación espontánea de patrones y el cambio de patrones que se produce en los sistemas abiertos cuando operan lejos del equilibrio (Kelso, 2000). Ya se ha explicado el experimento de Bénard como ejemplo de un proceso de autoorganización en un sistema inanimado, y posteriormente se expondrán múltiples ejemplos relacionados con la motricidad humana.

Para que se dé dicha autoorganización será necesario un flujo constante de materia y energía a través del sistema, y que éste no esté en equilibrio para que puedan emerger nuevas estructuras. Así, los sistemas reciben la energía del exterior, pero las inestabilidades y saltos a nuevas formas de organización son el resultado de fluctuaciones internas, amplificadas por bucles de realimentación positiva. Debido a esta propiedad, se dice que los sistemas abiertos son estructuras disipativas (abiertas estructuralmente, ya que se relacionan con los flujos de materia y energía, pero cerrados organizativamente, ya que se autoorganizan, su orden y comportamiento no están impuestos desde el exterior). Las estructuras disipativas se mantienen en un estado lejos del equilibrio, y pueden desarrollarse hacia formas de

complejidad crecientes debido a su comportamiento como un todo y a los bucles de retroalimentación. Las condiciones iniciales ya no son olvidadas, y la indeterminación será otra de las características de este tipo de sistemas. No se puede predecir el tiempo más allá de unos pocos días, como tampoco podremos predecir el resultado exacto de cualquier tipo de intervención en un individuo. Todos poseemos pequeñas diferencias con relación al resto de los humanos, y éstas podrán interactuar con el resto de elementos del sistema y multiplicar infinitamente sus consecuencias.

4.9- Las variables colectivas o parámetros de orden

La autoorganización y sus consecuentes patrones emergentes estarán caracterizados por las **variables colectivas** del sistema, denominadas en física los **parámetros de orden** (Kelso, 2000). En la sinérgica, estos parámetros se crean por la cooperación entre las partes individuales del sistema, y a su vez, gobernarán o condicionarán el comportamiento de estas partes (causalidad circular). Si cogemos el ejemplo anteriormente descrito del experimento de Rayleigh-Bénard, la amplitud de los círculos de convección será el parámetro de orden. Todas las moléculas del fluido perderán su independencia para estar sometidas a un patrón ordenado y coordinado que puede ser descrito utilizando el concepto del parámetro de orden. Este comportamiento será una forma especial de causalidad circular, pero imposible de definir mediante los conceptos clásicos de feedback, input y output o estímulo y respuesta, debido a la multitud de partes que interactúan y a las interacciones no lineales que se producen. Las variables colectivas definirán las relaciones estables y reproducibles entre los componentes interactuantes de un sistema, y pueden ser identificadas con facilidad cerca de las transiciones o bifurcaciones. La coordinación dinámica del sistema, es decir, las ecuaciones de movimiento que gobiernan la actividad coordinativa, se define mediante estas variables colectivas (Kelso y Ding, 1993).

4.10- Los grados de libertad

El número de variables colectivas o parámetros de orden de un sistema definirá los **grados de libertad** de éste, que serán los componentes de dicho sistema y sus múltiples posibilidades para ordenarse, así como los condicionantes a los que está sometido. El conocer los grados de libertad del sistema nos dará la posibilidad de estudiar su autoorganización (Corbetta y Vereijken, 1999). Los grados de libertad estarán organizados en agrupaciones o sinergias, que serán unidades funcionales, flexibles y temporalmente fijadas en una tarea específica. Estas unidades funcionales también serán estructuras disipativas.

El conocer el número de grados de libertad necesarios para describir las modificaciones de un sistema determinará su complejidad. Por ejemplo, si un comportamiento rítmico requiere n grados de libertad activos, entonces la dimensionalidad de la estructura coordinativa que ejecuta el movimiento no podrá ser menor de n (Kay, 1988). Por este motivo, en algunos estudios se utiliza el número de grados de libertad como parámetro que define la complejidad del movimiento, considerando que aquel que pueda ser definido por menos ecuaciones diferenciales será el más sencillo de ejecutar.

4.11- Los parámetros de control y las bifurcaciones

Para poder analizar el comportamiento del sistema, también necesitaremos conocer los **parámetros de control**, concepto similar al de variable independiente. Éstos serán las variaciones ambientales que ocurren de forma natural o las manipulaciones específicas experimentales que llevan al sistema a los diferentes estados y producen el cambio (Kelso, 2000). Estos parámetros serán inespecíficos, aunque en los sistemas biológicos serán específicos informacionalmente. En el experimento de Rayleigh-Bénard, el parámetro que producirá el cambio de patrón de organización de las

moléculas será la temperatura del líquido. A partir de un determinado valor crítico de la temperatura, el comportamiento del líquido cambiará de forma cualitativa. Estos cambios cualitativos siempre se producirán por una inestabilidad, y se denominarán transiciones fase en estados de no equilibrio o **bifurcaciones**. En estos puntos de inestabilidad el comportamiento será impredecible, y podrán surgir espontáneamente nuevas estructuras de orden y complejidad creciente. En la figura 19 se muestra un diagrama de bifurcación que podría representar el cambio que se produce en el fluido cuando alcanza la temperatura crítica. Antes de que se llegue a este valor, el sistema está en reposo, representado por la bolita negra. El estado del sistema, q , estará en el mínimo de su potencial. Al alcanzar la temperatura crítica, en el punto de inestabilidad, se produce una bifurcación en la que existen dos posibilidades de rotación que emergen espontáneamente, hacia la derecha (A) o hacia la izquierda (C). Una solución estable se convierte en inestable (B). No obstante, no siempre que haya una pérdida de estabilidad se producirá necesariamente una bifurcación (Carson, 1995). La presencia de bifurcaciones en el comportamiento de cualquier sistema será una señal de no linealidad, por lo que si se encuentran en la ejecución del movimiento humano o en cualquier proceso fisiológico denotarán que estos no pueden ser explicados de forma lineal.

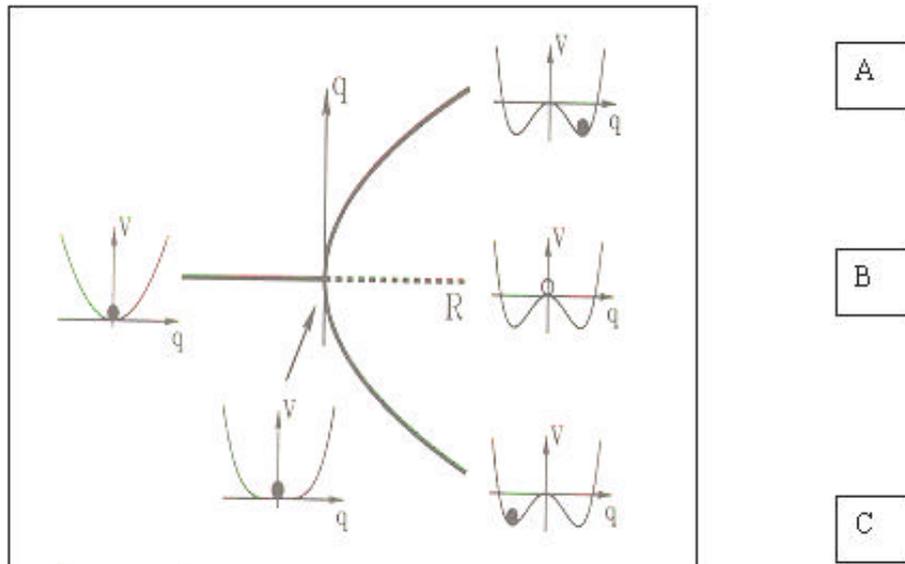


Figura 19 Diagrama de una bifurcación y espacio potencial que representa el comportamiento del fluido del experimento de Rayleigh-Bénard. V es la función potencial, R es el parámetro de control y q representa el estado del fluido. Las bolitas negras representan estados estables del potencial, mientras que las blancas inestables (Kelso, 1999).

4.12- Las fluctuaciones

Cerca de los puntos críticos se producirán **fluctuaciones** que anticiparán el cambio. Estas fluctuaciones probarán el sistema y darán la oportunidad de descubrir nuevos patrones de organización, por lo que las fluctuaciones tendrán un rol tanto práctico como conceptual en la dinámica de la coordinación (Kelso, 1997). En el experimento de Rayleigh-Bénard, no se pasará instantáneamente del desorden total a los flujos de convección, sino que se pasará por un periodo de gran variabilidad.

Una consecuencia de esta interpretación de la dinámica de los sistemas es la importancia de la estabilidad, y se puede medir calculando la magnitud de las fluctuaciones. Una forma de realizar este cálculo es midiendo la desviación estándar de la variable colectiva, x , alrededor del atractor. Cuanto más estable sea el atractor, más pequeña será la desviación. No obstante,

existen otras herramientas de análisis para cuantificar las fluctuaciones o la inestabilidad de cualquier sistema.

4.13- El tiempo de relajación y el critical slowing down

Otra medida de la estabilidad será el **tiempo de relajación**. Si el sistema se aleja de su estado atractor o punto estacionario por una perturbación, el tiempo que tardará en retornar a ese punto será bastante dependiente de la medida de la perturbación, pero muy dependiente de la estabilidad del atractor. Si aplicamos una fuerza a un péndulo que se encuentra en una posición de equilibrio, volverá a su estado atractor, pero el tiempo que tarde dependerá de la magnitud de la fuerza aplicada y de las características del péndulo y de su entorno. Cuanto más pequeño sea el tiempo de relajación más estable será el atractor. Cuando hay un incremento de este tiempo se denomina **critical slowing down**, y veremos ejemplos de este fenómeno posteriormente (Kelso y Ding, 1993).

4.14- Los “errores” y la variabilidad

En cualquier proceso de aprendizaje, previamente a que el comportamiento del sujeto cambie, se producirán fluctuaciones que anticiparán este momento, por lo que los errores en cualquier proceso de aprendizaje deberán ser considerados como fluctuaciones necesarias para la optimización del proceso. Por ejemplo, si en el aprendizaje de una técnica deportiva hay un periodo en el que no se producen cambios significará que se ha entrado en un ciclo límite, y para progresar habrá que salir de éste. Así, la variación de los estímulos podrá provocar que se recorran otros puntos del espacio fase y que se realicen "errores", que en realidad no serán

más que fluctuaciones que llevarán al descubrimiento de la solución óptima por el propio sistema.

El concepto de fluctuaciones lleva a otro fundamental en el estudio del movimiento, la variabilidad. Los patrones coordinativos son variables y estables a la vez, pero la variabilidad observada no será sinónimo de aleatoriedad, y el control o estabilidad no será sinónimo de determinismo. Para una variable aleatoria, cualquier valor posible tiene las mismas posibilidades que otro para que se dé. En un proceso determinístico, en cambio, los estados previos determinarán completamente los estados futuros. Aleatoriedad y determinismo son conceptos opuestos, y el concepto de estocástico une a los dos. Un proceso estocástico evoluciona a través del tiempo y cada paso está gobernado por la probabilidad, pudiendo tener elementos aleatorios y deterministas (Riley y Turvey, 2002). En el movimiento humano, la cantidad de grados de libertad existentes y variables que actúan hacen que, a pesar de ser un proceso determinístico, no podamos predecir el movimiento exacto. No obstante, tenemos indicadores cualitativos para predecir el cambio, como es el caso de las fluctuaciones, que nos pueden indicar la proximidad de una bifurcación.

La variabilidad será una medida de la estabilidad de un atractor, así como la resistencia a las perturbaciones. Pero ello no significa que la variabilidad no sea deseable, ya que el paso por inestabilidades permitirá evolucionar hacia nuevos estados. Aplicado al entrenamiento, el deportista deberá explorar todo el espacio por el que se puede desenvolver para encontrar la mejor solución motriz o para mejorar la solución que había encontrado previamente.

4.15- La histéresis y la intermitencia

En el espacio fase se producirá fenómenos como la **histéresis**, que hace referencia al fenómeno que sucede cuando un parámetro cambia de dirección y el comportamiento se queda tal y como está, retrocediendo el retorno a un estado previo, de forma que muchos estados de comportamiento pueden coexistir para un mismo valor de parámetro. También la **intermitencia** es un fenómeno de los sistemas metaestables, que viven al límite de la inestabilidad del sistema. Esto es lo que ocasiona su multifuncionalidad, ya que hay diferentes modelos que coexisten en la misma red debido a que todo el sistema complejo posee diferentes atractores. También la inestabilidad es lo que dará flexibilidad al sistema.

En el apartado 2.1 de esta tesis se puso el ejemplo de las figuras reversibles. La percepción de estas figuras muestra intermitencia, ya que tan pronto percibimos una imagen como percibimos otra. También hay ejemplos de sucesiones de imágenes que son percibidas de un modo u otro en función del orden de presentación de éstas, mostrando histéresis. En los apartados 5.1 y 5.2 se expondrán diversos estudios que muestran como la coordinación motriz también está caracterizada por la presencia de este fenómeno. En función del cambio de determinados parámetros de control, como la frecuencia de movimiento, el sistema modificará la distribución de sus atractores. Cuando se aumenta la frecuencia del movimiento, por ejemplo, incrementando la velocidad de una cinta rodante en la que un sujeto está caminando, el cambio de atractor (de caminar a correr) se producirá en un valor concreto de dicha frecuencia (velocidad de la cinta). Si se realiza este experimento disminuyendo la velocidad de la cinta, el cambio de atractor (de correr a caminar) se producirá en otro valor distinto (Diedrich y Warren, 1998).

4.16- La dinámica intrínseca del sistema y la dinámica de la tarea y el proceso de cooperación-oposición

Los patrones que emergen de las bifurcaciones serán atractores de la dinámica de las variables colectivas. Esta dinámica será la **dinámica intrínseca** del sistema, que puede definirse como el comportamiento colectivo del sistema que se da en ausencia de requerimientos específicos de la tarea. Ésta será esencialmente no lineal, lo que producirá un comportamiento complejo con bifurcaciones, caos y componentes estocásticos.

En el caso del organismo humano, para poder estudiar el aprendizaje o adquisición de una habilidad motriz, habrá que distinguir entre la dinámica intrínseca y la **dinámica de la tarea** (Kelso, 1999). La dinámica intrínseca será la tendencia espontánea de coordinación del organismo en el inicio del proceso de aprendizaje, y la dinámica de la tarea será la influencia específica de la tarea, intención o la información del medio. Se establecerá así un proceso de cooperación-oposición entre ambas (Schöner y Kelso, 1988). Dada una tarea, la dinámica intrínseca estará presente en ausencia de requerimientos específicos definidos por el medio, la memoria o incluso la intención. Estará influenciada por las interferencias, ya que a pesar de que se describa un sistema en un estado ordenado por unas pocas variables colectivas, contiene muchos más grados de libertad y está influenciado por esta dinámica de altas dimensiones (Haken, 1975). La dinámica intrínseca dependerá de la historia previa del organismo y tiene como consecuencia directa la necesidad de individualizar a la hora de estudiarlos. Cada individuo tendrá una historia única, por lo que su estado inicial será siempre diferente al de cualquier otro, y los patrones o modelos que se generen serán también siempre únicos.

4.17- El movimiento y la dinámica del sistema

Es importante la distinción entre el movimiento y la dinámica del sistema. El movimiento será la salida o “output” observable de los componentes del sistema. La dinámica se refiere a las relaciones de estímulo-respuesta o entrada-salida que se producen entre los componentes del sistema. La entrada podrá estar constituida por información o energía de otros componentes del mismo sistema, y si producen un cambio en otro componente se habrá producido una relación dinámica, ya que la salida de un componente se convierte en la entrada de otro. Estas relaciones dinámicas serán complejas si influyen o están influenciadas por otras de otros componentes del mismo o de otro sistema (Riccio, 1993).

4.18- La coordinación absoluta y la coordinación relativa

En los sistemas físicos se pueden producir fenómenos de coordinación absoluta, pero esto no se produce en los sistemas vivos, y se observan acoplamientos más débiles entre sistemas. El estado de coordinación no se mantiene constantemente, sino que es relativamente estable, y se puede observar por los saltos entre acoplamiento y desacoplamiento o por los cambios entre radios de frecuencia y/o relación fase entre los componentes (Amazeen et al., 2001). En la figura 20 aparece la representación que hace Kelso (1999) sobre estos dos tipos de coordinación.

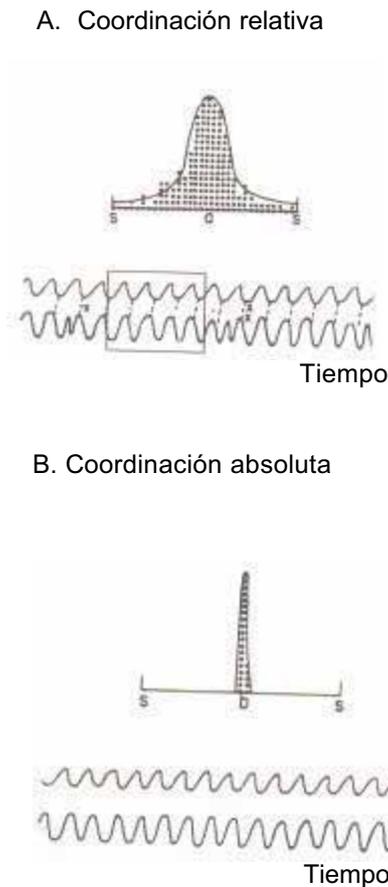


Figura 20 Coordinación absoluta/relativa: a/ La figura superior muestra la coordinación relativa mediante la distribución de las posibles relaciones de fases entre dos señales. El eje de las abscisas representa todas las posibilidades de relación, de 0 a 2π . La figura inferior muestra las correspondientes series temporales de dicha relación de fases, perteneciente a los movimientos del pectoral y del dorsal de un pez. B/ Coordinación absoluta que no corresponde a ningún sistema biológico real (Adaptado de Kelso, 1999).

4.19- El tripartite scheme

Por último, citar lo denominado por Kelso el “tripartite scheme”, es decir, los tres componentes imprescindibles para conocer y entender el nivel de organización de cualquier sistema: los parámetros que actúan en el sistema, la interacción entre ellos, y los patrones que emergen como consecuencia de la interacción. Los condicionantes de este proceso se crearán y desaparecerán continuamente, y lo que en un nivel actuará como condicionante, en otro actuará como parámetro. Este esquema es

dependiente del nivel de análisis y jerárquico, pero no estará condicionado por una causalidad circular unidireccional (Kelso, 1999).

5- Aplicaciones de la TSD al estudio de la coordinación motriz

La coordinación motriz abarca la relación entre los distintos planos de la organización, componentes y estados funcionales del sistema motor (coordinación interna), así como la relación entre el sistema motor y los eventuales objetivos y acontecimientos del entorno (coordinación externa) (Nitsch y Munzert, 2002).

En 1929, Bernstein ya explica la coordinación motriz en términos muy similares a los que se utilizan en la teoría de los sistemas dinámicos, tal y como se puede observar en el párrafo siguiente (Bernstein y Popova, de Boongardt y Meijer, 2000):

“Durante ritmos lentos, el movimiento [del pianista] consiste en impulsos aislados; durante ritmos medios, el movimiento corresponde a la oscilación de un péndulo compuesto; durante los ritmos más rápidos, hay una transición a oscilaciones forzadas elásticas de un péndulo simple.”

Pero no es hasta medio siglo después cuando se producen las primeras y más determinantes aportaciones de la TSD en el estudio del movimiento humano, que se dieron y todavía se dan en el análisis y comprensión de los fenómenos coordinativos cíclicos. La figura más representativa de esta línea de investigación ha sido J.A. Scott Kelso, y su obra aparece referenciada en prácticamente todos los estudios posteriores de control motor que aplican la TSD.

5.1- El modelo HKB

Desde la publicación de Kugler, Kelso y Turvey en 1980 sobre la aplicación de la teoría de los sistemas dinámicos a la acción motriz, se inició una nueva línea de investigación en el campo del aprendizaje y el control motor (Kugler, Kelso y Turvey, 1980). En ésta se explicó la fenomenología de los sistemas biológicos en términos de regularidades de los sistemas dinámicos no lineales, y no sólo por la acción del control intencional.

Hasta entonces, predominaba la hipótesis de la existencia de programas motores o de generadores centrales de patrones almacenados en el sistema nervioso para explicar la coordinación del movimiento en los seres humanos y en animales. Pero las teorías sobre control motor que se basaban en el concepto del programa motor empezaron a ser criticadas debido a diferentes causas. En primer lugar, no se explican con un lenguaje común a otras ciencias, como la biología o la física, lo que dificulta la búsqueda de relación entre todos los elementos que componen el sistema. En segundo lugar, la naturaleza compleja del ser humano requiere mayor flexibilidad y adaptabilidad que lo que permite un programa motor y éste además requiere el conocimiento previo del resultado pretendido (Beek et al., 1996; Schmidt y Fitzpatrick, 1996; Schöner y Kelso, 1988; Verheul, 2004). Por ello Kugler y sus colaboradores se plantearon el problema fundamental del movimiento identificado por Bernstein sobre la regulación de los grados de libertad y aplicaron la denominada teoría homeocinética. Ésta considera a los sistemas biológicos como conjuntos de procesos no lineales con osciladores de ciclo límite unidos y coordinados por distintos niveles de organización. Los patrones de coordinación que emergerán se podrán predecir teniendo en cuenta las propiedades no lineales de los osciladores de ciclo límite.

Bajo este marco teórico se realizaron experimentos sobre la coordinación entre diferentes miembros del ser humano (Kelso et al., 1981, Kelso, 1984), y en 1985 se publicó el trabajo experimental de Haken, Kelso y Bunz (Haken, Kelso y Bunz, 1985) con la confección de un modelo teórico no

lineal que explicaba el comportamiento coordinativo. Se considera a un modelo teórico una idealización del sistema que no predice necesariamente todos los detalles del comportamiento del sistema pero que tampoco predice nada que contradiga las observaciones realizadas experimentalmente (Fuchs y Kelso, 1994).

La tarea, ideada por Kelso, consistía en mover rítmicamente dos dedos (los dedos índices de cada mano) de lado a lado en la posición que se muestra en la figura 21 al ritmo de un metrónomo. Se iniciaba el movimiento de forma paralela, activando los músculos homólogos alternativamente, es decir, con una relación entre los dos miembros denominada antifase. Se pidió a los sujetos que no modificaran el movimiento de forma consciente si notaban que el patrón iba a cambiar, sino que dejaran que los dedos se movieran de la forma más confortable. A cada pulsación del metrónomo, los sujetos debían finalizar un ciclo completo, y la frecuencia se fue incrementando progresivamente. Se observó que a partir de un valor crítico de frecuencia, el movimiento cambiaba espontáneamente y los dedos empezaban a moverse en fase, activándose los músculos homólogos de forma simultánea (véase fig. 22).

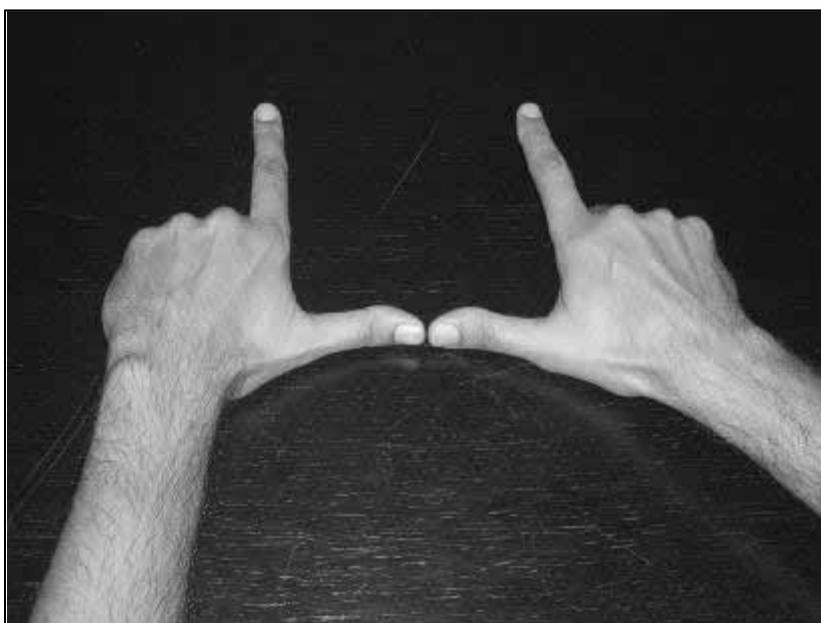


Fig. 21 Posición de las manos de la tarea ideada por Kelso. Los sujetos debían mover los dedos en el plano transversal con la misma frecuencia.

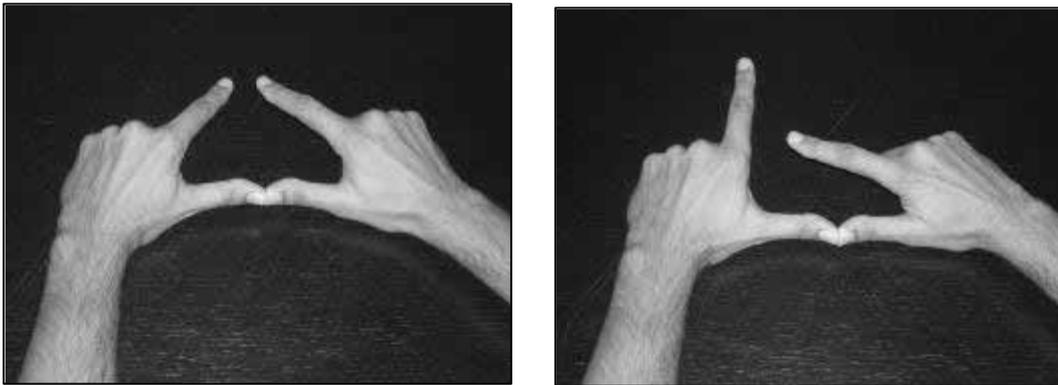


Fig. 22 Movimiento de los dedos. En la primera fotografía el movimiento es en fase, y en la segunda es en antifase.

Este cambio de patrón no sucedía cuando se realizaba el experimento en sentido inverso, es decir, empezando con una relación entre los dedos en fase. Así, se mostró una transición involuntaria en la coordinación rítmica de dos miembros, demostrando que existen dos patrones estables a frecuencias bajas y sólo uno a partir de un valor crítico de la frecuencia, que será el parámetro de control del sistema. Como parámetro de orden se escogió la relación fase entre los dos dedos, y los estados estables serán los atractores. Se produce así una bifurcación clara a partir de un valor del parámetro de control, pasando el sistema a tener un atractor en vez de dos. En la figura 23 se muestran las series temporales del experimento teniendo en cuenta la posición de los dedos y su relación fase. El cambio no será instantáneo, sino que en la zona previa se producirán fluctuaciones de la relación fase, las denominadas **fluctuaciones críticas**.

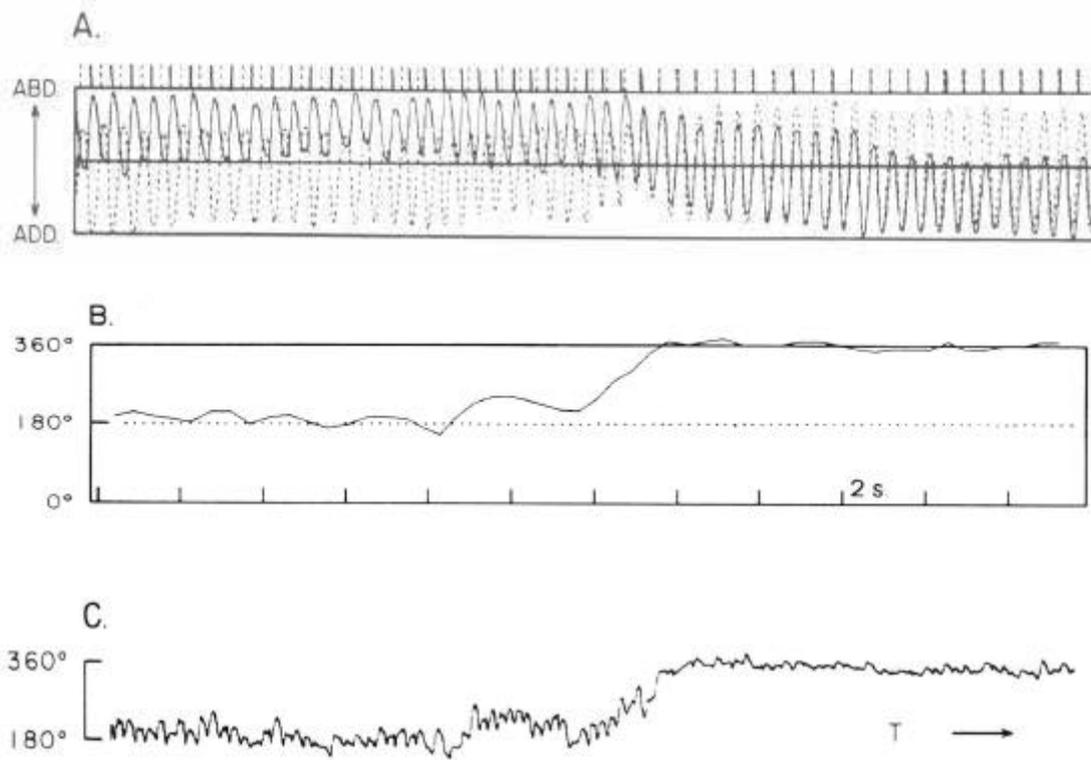


Fig. 23 A. Series temporales de la posición de los dedos mostrando la transición del movimiento antifase al movimiento en fase cuando se incrementa la frecuencia. La línea continua muestra la posición del dedo de la mano izquierda, y la discontinua la de la derecha. B. El mismo fenómeno pero teniendo en cuenta la fase relativa entre los dedos. Se indica la posición relativa del dedo izquierdo con relación al ciclo del dedo derecho. C. Misma fase relativa pero obtenida de la diferencia entre las fases individuales de ambos dedos (Kelso, 1999).

A partir de esta tarea experimental, se construyó el denominado modelo Haken-Kelso-Bunz (HKB) teniendo en cuenta los atractores del sistema, que será la relación en fase ($\phi=0$) y antifase ($\phi=\pm\pi$). En la figura 24 se representa gráficamente el comportamiento del sistema en términos de la función potencial, $V(\phi)$, y del radio b/a (relación inversa de la frecuencia), y en la figura 25 se representa el espacio potencial de dicho modelo.

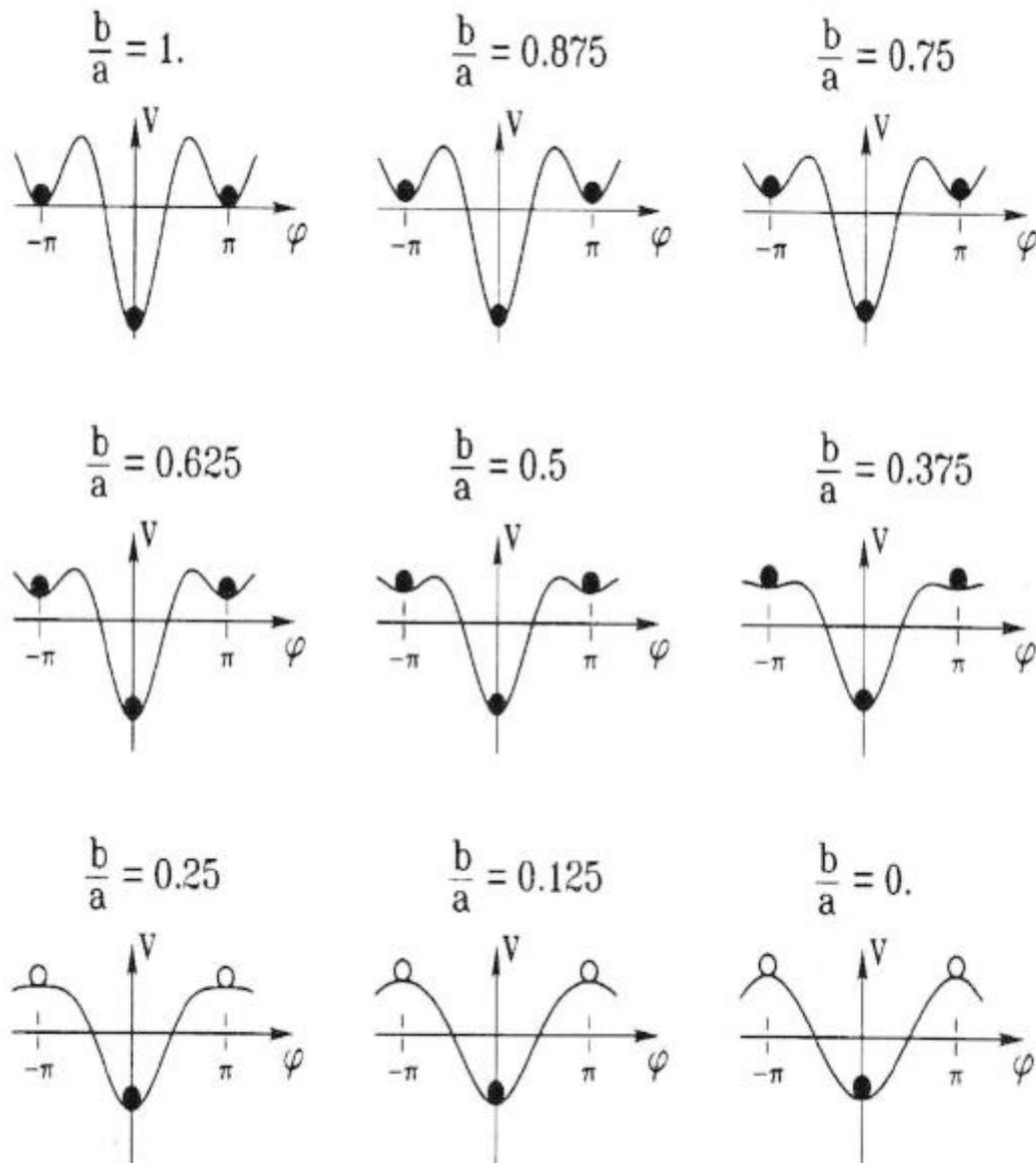


Fig. 24 El modelo HKB de coordinación. Las bolitas negras representan estados estables del sistema, y las blancas inestables (Kelso, 1999).

b/a : Relación inversa de la frecuencia; V : Función potencial; f : Relación fase

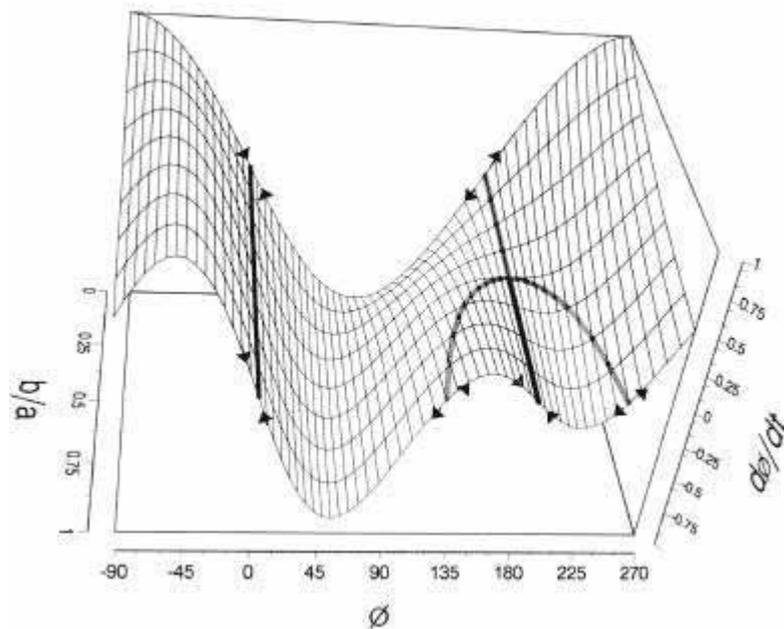


Fig. 25 Espacio potencial del modelo. Las líneas señaladas corresponden a los atractores o repelentes (en función de la dirección de las flechas) de la dinámica colectiva. Cuando el parámetro de control b/a decrece se produce la bifurcación (Kelso, 1999).

b/a : Relación inversa de la frecuencia; $?$: Relación fase

La ecuación del movimiento que captura la dinámica de la tarea es la siguiente:

$$\ddot{\Phi} = -a \sin \Phi - b \cos 2\Phi$$

Las propiedades dinámicas de la ecuación se resumen a continuación (Fuchs y Jirsa, 2000):

- Para cualquier valor de $a > 0$ y $b < 0$ hay puntos fijos $\phi_0=0$ y $\phi_\pi=\pi$ que corresponden al movimiento en fase y en antifase respectivamente
- En la región del parámetro $b/a > 1/4$ que corresponde a bajas frecuencias de movimientos cíclicos, ambos puntos son estables. Los movimientos se pueden realizar en fase y en antifase.

- En la región del parámetro $b/a < 1/4$ que corresponde a altas frecuencias del movimiento, el punto fijo ϕ_π es inestable y sólo es estable el punto fijo ϕ_0 , que corresponde al movimiento en fase.

Los movimientos de las manos se describen como dos osciladores no lineales acoplados autónomos, es decir, que no están conducidos desde el exterior. Se asumen así dos osciladores autónomos de ciclo límite, por lo que cuando se perturba a una parte del sistema (una mano) no se rompe la relación entre las manos, y la parte perturbada vuelve casi inmediatamente al ciclo límite.

Este experimento pasó a ser el típico ejemplo de los libros de texto en los que se explicaba la aplicación de la TSD a la acción motriz, y fue ampliado extensamente con el estudio de la coordinación entre otras partes y miembros del organismo humano o incluso entre organismos distintos (Schmidt et al., 1990; Kelso, 1999). En estos primeros estudios, el primer paso fue identificar el parámetro de orden que capturase la dinámica intrínseca del sistema, que será la relación fase relativa entre los miembros oscilantes. El siguiente paso fue formular la ecuación potencial que capturase los estados estables descritos por el valor invariante de esta variable. Entonces se añadió la dinámica intrínseca, en términos de instrucciones de la tarea o condicionantes físicos para ser modelados en la ecuación, capturando así en el mismo nivel de análisis la dinámica intrínseca y la extrínseca. Se demostró que cuando el parámetro de control sobrepasa un cierto valor crítico, una solución del modelo se convierte en inestable y se produce una bifurcación.

Las ciencias no lineales han crecido rápidamente, y nos ofrecen nuevas herramientas y técnicas que capturan las propiedades de los sistemas no lineales, como las series temporales no lineales o los modelos mecánicos. Éstas ya han sido aplicadas en muchos estudios de coordinación, así como para entender patrones de locomoción.

5.2- Generalización de la aplicación de la TSD en el estudio de la coordinación de movimientos cíclicos

Kelso continuó experimentando sobre este concepto, y lo quiso ampliar con el estudio de la coordinación entre más de dos miembros, como es el caso de una pierna y un brazo (Kelso y Jeka, 1992), o entre las piernas y los brazos con la ayuda de una máquina multiarticular (Jeka et al., 1993). Se observó la misma dinámica, basada en estados estables de coordinación con transiciones espontáneas (Kelso, 1999). En esta dinámica se presentan tres aspectos clave: todos los pares de miembros (dos manos, dos piernas, dos brazos...) producen patrones estables en modo en fase y en modo antifase; el acoplamiento entre los miembros homólogos (pierna y brazo derecho o pierna y brazo izquierdo) es más fuerte que entre lo no homólogos; y hay simetría entre el lado derecho e izquierdo.

Otros autores también lo aplicaron a la coordinación entre diferentes miembros (Baldissera et al., 1982; Fitzpatrick et al., 1996; Salesse et al., 2003) o entre diferentes partes del mismo miembro (Carson et al., 1995). Athènes et al. (2004) estudiaron si la tarea de escribir también estaba gobernada por la dinámica de osciladores no lineales acoplados. Seis sujetos dibujaron 26 formas elípticas de diferentes grosores y orientaciones que correspondían a la manipulación de la fase relativa entre los osciladores. Se mostró como existían patrones coordinativos preferentes que atraían al sistema, más estables que el resto y que se podían ejecutar a mayor velocidad y con mayor precisión. Incluso apareció el fenómeno de la histéresis en función de la dirección en la que se dibujaba la secuencia de formas elípticas. No obstante, y a diferencia de la tarea de oscilación de dos dedos, emergieron más estados atractores, mostrando multiestabilidad. Este fenómeno también se ha observado en la coordinación de tareas con más grados de libertad que la de la oscilación de los dedos, como es el caso de la oscilación de péndulos con las muñecas. En este tipo de tareas, la

transición se produce al pasar de oscilar los péndulos en el plano horizontal a producir formas elípticas (Kelso, 1998).

También se aplicó a la coordinación entre un brazo y un estímulo visual (Byblow et al., 1995; Wimmers et al., 1992) o sonoro (Calvin y Temprado, 2003), o entre dos piernas de diferentes sujetos (Schmidt et al., 1990). En este último se muestra la coordinación entre dos miembros de personas distintas utilizando los mismos parámetros de orden y de control que en el modelo HKB (relación fase entre los dos miembros y frecuencia del movimiento). Estas aportaciones contribuyeron a dar más consistencia a la perspectiva, buscando la explicación de la mayor estabilidad de un patrón con relación a otro y qué procesos conducen a la transición de fases, ya que eran éstas cuestiones todavía sin resolver. El estudio de Schmidt sugirió además que los principios que gobernaban la dinámica eran independientes de los componentes neurales o de la naturaleza del acoplamiento (visual en el caso de dos personas distintas, háptico en el caso de dos miembros de la misma persona). Tampoco se creyó que fueran por factores mecánicos, como la inercia, puesto que la variedad de tareas en las que se ha demostrado el acoplamiento sugiere causas distintas (Baldissera, 1982; 1991). Dependían más de la interacción de la información, tal y como también defienden Wimmers et al. (1992) cuando estudia la coordinación de un brazo con el movimiento de una señal externa visual conducida. Las transiciones ocurren si en el nuevo patrón los objetivos de la tarea pueden ser satisfechos con unos costes informacionales más bajos. No obstante, esto se cumplirá siempre y cuando los condicionantes biomecánicos no sean excesivamente fuertes y por tanto la organización neuromuscular del individuo permita ejecutar la tarea (Calvin y Temprado, 2003).

El modelo HKB también se mejoró con la colaboración de Schöner (Beek et al., 1995), que incluyó fuerzas estocásticas cuyos efectos eran una función de la estabilidad del atractor del sistema. Se observó así que un temporal incremento de las desviaciones del atractor, las fluctuaciones críticas, era una variable predictora de la proximidad del punto de transición.

Previamente a la transición, se puede volver al atractor después de una perturbación externa a pesar de la pérdida de estabilidad. El tiempo que necesita el sistema para volver a ese estado será el tiempo de relajación, y el incremento de este tiempo el *critical slowing down* (Scholz et al., 1987). La medida de las fluctuaciones estará determinada por la estabilidad del atractor, por lo que son un buen indicador de la estabilidad local de un patrón particular, así como el tiempo de relajación. Court y colaboradores estudiaron estas hipótesis con 6 sujetos que realizaban una tarea de coordinación bimanual del antebrazo haciéndolo oscilar en fase y en antifase a frecuencias predeterminadas. Se midieron las fluctuaciones y el tiempo de relajación y se observó que eran parámetros muy individuales, pero que las fluctuaciones eran más grandes en el modo antifase que en el modo en fase (Court et al., 2002). El incremento de fluctuaciones y del tiempo de relajación son señales características de transiciones de fase en estado de desequilibrio.

En todas estas tareas coordinativas, el sistema es muy sensible a los condicionantes espaciales, es decir, a la dirección del movimiento, aunque los condicionantes anatómicos o activación de unos u otros grupos musculares también impondrán condicionantes a la dinámica (Byblow et al., 1994; Carson et al., 1995). Para analizar esta afirmación, Carson et al. (2000) estudian una tarea bimanual de pronación y supinación de las manos modificando la posición del eje de rotación (en el radio o en el cúbito). Cuando ésta es equivalente para las dos manos, se observan transiciones de movimientos en antifase a en fase, pero cuando la posición del eje de rotación es contraria, se producen transiciones de movimiento en fase a antifase. Así, si la tarea se realiza en un contexto mecánico adecuado, se puede conseguir que una relación antifase sea más estable que otra en fase, conclusión muy importante de cara a diseñar tareas de aprendizaje.

Se realizó otro estudio (Carson y Riek, 2000) en el que 5 participantes debían realizar movimientos de pronación y supinación del antebrazo izquierdo a una frecuencia predeterminada con un metrónomo auditivo. La

máxima pronación y supinación debía coincidir con cada pulsación del metrónomo, y también se modificó el eje externo de la rotación, adyacente al radio o adyacente al cúbito. Se registró electromiográficamente la actividad de los músculos principales de los dos antebrazos y se observó que la relación entre el nivel de activación y la excitabilidad de los músculos homólogos del brazo opuesto era sensible a la posición del eje de rotación. De hecho, el contexto mecánico en el que se ejecutaban los movimientos ejercía influencia sobre la excitabilidad de los músculos opuestos, sobre la transmisión de órdenes motoras. Wenderoth y Bock (2001) también analizan la influencia de los condicionantes musculares y espaciales en una tarea de coordinación bimanual que consistía en flexionar y extender los brazos en modo en fase o en antifase de forma perpendicular o paralela a éste (véase fig. 26). Así, cuando se realiza el movimiento perpendicularmente, los músculos homólogos actúan a la vez en el modo en fase, mientras que paralelamente ocurre lo contrario. Mediante este sencillo experimento se pudo comprobar como ambos condicionantes influyen en la ejecución de esta tarea, así como para adquirir nuevos patrones de coordinación.

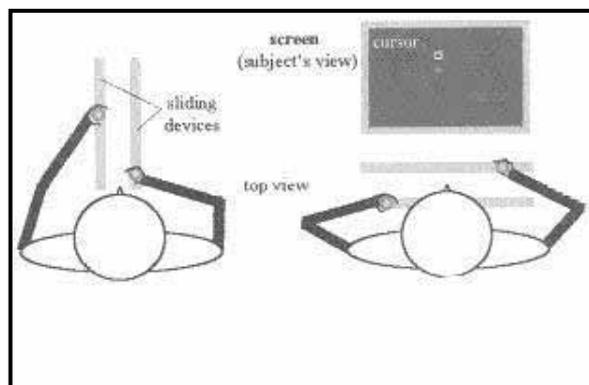


Fig. 26 Wenderoth y Bock. Experimento en el que se realiza una tarea de coordinación bimanual de flexo-extensión de los brazos de forma perpendicular o paralela al sujeto (Wenderoth y Bock, 2001).

La tarea propuesta por Kelso de la cual se realizó el modelo HKB, a pesar de su relativa simplicidad, presenta muchas similitudes con los patrones rítmicos de locomoción, que también son estudiados bajo esta perspectiva.

La coordinación entre los miembros representará un parámetro de orden para caminar (Williams et al., 2003) y se centrarán en las propiedades de la estabilidad de los patrones espaciotemporales de las distintas partes del cuerpo coordinadas entre ellas y con el medio. La dinámica estará caracterizada por la oscilación debido a los efectos de la gravedad y de la inercia. La locomoción estará definida por el desplazamiento del centro de gravedad del cuerpo con relación al centro de presión, y el movimiento de todo el cuerpo se asemejará al de un péndulo invertido. La frecuencia de resonancia del sistema parece ser un factor determinante en el patrón espontáneo de caminar, y se han realizado modelos que simulan el patrón locomotor caracterizados por un ciclo límite estable generado por la interacción global entre el sistema y el medio (Taga, 1995). Cualquier movimiento rítmico, y no sólo en los patrones de locomoción, parece que resulta más sencillo para el sistema nervioso central cuando se ejecuta a la frecuencia de resonancia, consumiendo menos energía, realizando el movimiento de forma más estable y reproducible y con trayectorias más predecibles (Goodman et al., 2000). Los cambios cualitativos o las transiciones de fase se asocian con una gran reducción de la información, que permite la identificación de las variables colectivas relevantes (Beek et al., 1995; Donker et al., 2001). El patrón de caminar y de correr es distinto en todos los animales, y uno u otro surgirá en función de múltiples condicionantes y sus relaciones. Son conocidos los experimentos con gatos y caballos que modifican el patrón de locomoción a partir de un valor crítico de velocidad adoptando el más “económico” energéticamente no sin antes haber pasado por una transición caracterizada por la presencia de fluctuaciones críticas del patrón (Kelso, 1999). Se han realizado también estudios con seres humanos, que analizan la influencia de la dinámica del sistema y de la dinámica del medio, y Diedrich y Warren (1995) han observado un incremento de variabilidad en la transición. Se basaron en la teoría de los sistemas dinámicos, proponiendo la fase relativa entre las piernas como variable colectiva que incrementa su variabilidad durante la transición.

Años atrás, el estudio de la locomoción estaba dominado por la creencia de los programas motores creados por el sistema nervioso y ejecutados por el sistema músculo-esquelético. La neurociencia se centró en explicar cómo la actividad del sistema nervioso causa el movimiento en el cuerpo, y la biomecánica en cómo la dinámica del sistema músculo-esquelético responde a los estímulos o inputs neuronales. ¿Pero cuál era la causa y cuál era el efecto? El movimiento es fruto de la interacción entre el sistema músculo-esquelético, el sistema nervioso y el medio, y los estados de atracción surgirán de la interacción de todo el sistema. Esto queda demostrado en el estudio realizado por Diedrich y Warren (1998) en el que se modifican las variables que afectan la energética de caminar y correr añadiendo peso a los miembros inferiores y variando la pendiente de la superficie. Se comprobaron cambios en la distribución de los atractores. Concretamente, se modificaron las frecuencias naturales de caminar y correr, la longitud del paso y el momento en el que ocurría la transición. Esta transición muestra claramente las propiedades de los sistemas dinámicos:

- a) En la transición hay una reorganización repentina y cualitativa del sistema, reflejada por un cambio de la fase relativa de los segmentos.
- b) Hay una tendencia del sistema a permanecer en la cuenca de atracción cuando el parámetro de control mueve el sistema a través de la región de transición. Se observa histéresis, la transición de caminar a correr ocurre a una velocidad mayor que la transición de correr a caminar.
- c) El sistema locomotor muestra una pérdida de estabilidad en la región de la transición, mostrando fluctuaciones críticas y critical slowing down
- d) La transición ocurre en un solo paso (bifurcación entre dos atractores)

Hay autores que defienden que las transiciones de paso actúan para reducir la energía consumida y el trabajo para acelerar los segmentos (Minetti et al., 1994), considerando la energética una manifestación de la dinámica intrínseca de la tarea, porque refleja el coste de conducir al sistema fuera de los estados de sus atractores. En el estudio de Diedrich y Warren (1998) esto no se corresponde exactamente, ya que la velocidad más estable no es precisamente la óptima energéticamente, pero consideran que realmente la energía y la estabilidad van muy unidas y las diferencias pueden ser debidas a parámetros que no son propios de la conducción del paso. Otros autores llegan a conclusiones similares (Brisswalter y Mottet, 1996; Holt et al., 1995; Hreljac, A. 1993), aluden a la interacción con factores cognitivos (Li, 2000) o defienden que la transición ocurre por factores cinéticos (Farley y Taylor, 1991), o cinemáticos (Hreljac, 1995), pero no lo demuestran claramente. Turvey et al. (1999) consideran erróneas las últimas conclusiones, pero sí que defienden que las medidas metabólicas y mecánicas están íntimamente relacionadas y que debido a ello se puede predecir el momento de la transición.

Carson et al. (1999) realizan un estudio similar al de Diedrich y Warren pero con una tarea en la que se debía flexionar y extender el codo y la muñeca de forma cíclica y rítmica en los modos de coordinación en fase y en el modo antifase a la frecuencia individual que resultase más confortable. Se añaden diferentes pesos y la frecuencia se modifica a partir de un peso determinado.

La frecuencia también se modifica como consecuencia de la experiencia, que aumenta a medida que se realizan más intentos. Tanto este estudio como los referenciados anteriormente sobre la locomoción son pruebas evidentes de que la dinámica de la tarea dependerá de la dinámica del sistema y de la dinámica del medio, y los estados de atracción surgirán de la interacción de todo el sistema.

Otra generalización estudiada es la de la ejecución de tareas con patrones de coordinación n:m. En todos los estudios citados, las tareas en las que se

debe coordinar diferentes miembros siguen patrones de 1:1, pero también se ha analizado la interacción entre miembros con multifrecuencias o con modelos polirítmicos. Esta interacción tendrá estados más estables cuando las frecuencias se relacionen en patrones simples del tipo de 2:1 o 3:2 (Peper et al., 1995b). Cuando el tempo del modelo polirítmico se incrementa gradualmente ocurren transiciones abruptas a ratios de frecuencia más simples (por ejemplo de 8:5 a 3:2) (Peper et al., 1995a). Cuando el patrón no es de 1:1, se producen interferencias, y el miembro que ejecuta la frecuencia más baja suele realizar pequeñas oscilaciones durante la ejecución del ciclo adicional del miembro contrario. Sternad et al. (1999) evalúan la interacción de los dos brazos moviendo dos péndulos a frecuencias distintas, concretamente a 2:1. Diferentes sujetos practican la tarea hasta haberse familiarizado con ella con péndulos distintos. Consiguen llegar a un estado de equilibrio dinámico al realizar la tarea, aunque la presencia de fluctuaciones es mayor que cuando se realiza con un patrón 1:1. Los autores enfatizan en su estudio el poder utilizar las mismas variables colectivas que en los estudios de Kelso para estudiar dinámicas distintas.

La música será una estimulación más compleja, pero que provoca una sincronización similar, como pasa cuando seguimos un ritmo musical con las palmas, con el pie, o con todo el cuerpo en cualquier danza. Cuando escuchamos un ritmo musical, percibimos una pulsación o una estructura métrica que incita a la coordinación o sincronización con la música. De hecho, esta tendencia a sincronizarse con la música parece ser más fuerte que cuando lo hacemos con un metrónomo o con un estímulo visual. Thaut et al. (1997) mostraron como los errores de sincronización se reducían cuando se utilizaba la música en lugar del metrónomo. Large (2000) estudió también el fenómeno de la sincronización con la música desde la misma perspectiva que en los estudios citados sobre patrones auditivos, considerando la percepción métrica como un estímulo que provoca una formación de un patrón en un sistema dinámico. El sistema sufre una bifurcación que corresponderá al nacimiento de una oscilación automantenida que persiste incluso si temporalmente desaparece la

pulsación (como sucede en muchas piezas musicales). Así, el patrón presenta estabilidad pero a la vez flexibilidad, puesto que si el ritmo cambia, seremos capaces de coordinarnos con la nueva estructura temporal. Large modeliza también esta tarea considerando los principios de los sistemas dinámicos.

La fase relativa es el parámetro de orden más utilizado para describir el comportamiento dinámico de la coordinación, pero no el único. La topología espacial puede ser otro parámetro. Franz et al. (1991) estudiaron diversos sujetos que intentaban dibujar una trayectoria lineal alternativa con un brazo y una circular continua con el otro brazo durante 20 segundos. Se debían generar los movimientos a la misma frecuencia, determinada por un metrónomo, y la dirección relativa del movimiento la elegía el sujeto. La mayoría de los movimientos se realizaron en fase, y hubo desviaciones sistemáticas de las trayectorias que se pretendían. Tanto las trayectorias lineales como las circulares se transformaban en elípticas, sugiriendo que se acoplan a un patrón espacial común, igual que en otras tareas las trayectorias se acoplan a una misma fase (véase fig. 27). Walter et al. (2002) propusieron una tarea similar, pero en vez de una línea y una curva, estudiaron el dibujo de dos curvas distintas: un círculo y una elipse. Se observó también la interferencia por las diferentes características espaciales, y secundariamente hubo cambios en los aspectos cinemáticos del dibujo.

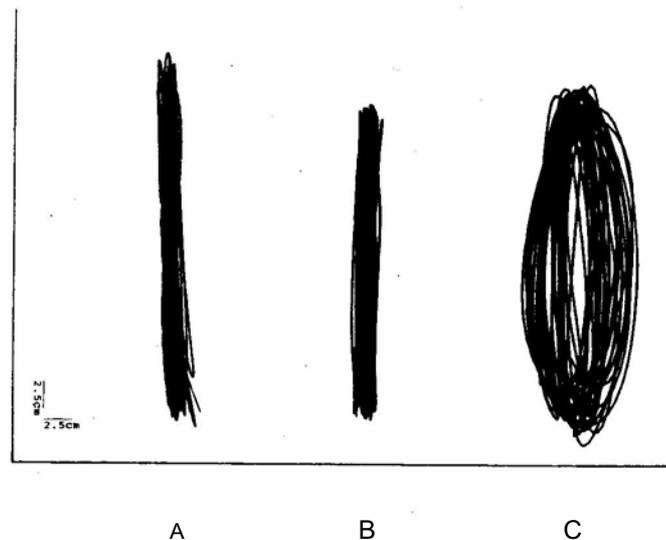


Fig. 27 Típico desplazamiento en los ejes X e Y cuando se dibuja una línea con una mano (A), cuando a su vez se dibuja una línea con la otra mano (B), y cuando con la otra mano se dibujan círculos en vez de líneas (C), durante 20 segundos (Franz et al., 1991).

Los dibujos de círculos también se han utilizado para diseñar tareas de acoplamiento entre las dos manos teniendo como parámetro de orden la fase relativa entre ellos. Byblow et al. (1999) añadieron además a la ya tradicional sincronización con una señal auditiva (metrónomo), una señal visual que era conducida en la misma dirección del movimiento o en la contraria. La compatibilidad de la señal visual con la dirección del dibujo permitía estabilizar los patrones simétricos y los asimétricos (éstos últimos siempre más inestables) retrasando el momento de la transición, demostrando la influencia de las características espaciales de la tarea al igual que las temporales.

También se ha estudiado la interacción entre una tarea rítmica y una discreta. Sternad, Satzman y Turvey (1998) propusieron una tarea en la que un brazo debía ejecutar una acción pendular de forma cíclica, mientras que el otro brazo ejecutaba un ciclo aislado o discreto cada cuatro ciclos del otro. Se modelaron los efectos de la interacción cinemática considerando dos unidades oscilantes y se observó una modificación considerable del comportamiento rítmico. Se produjeron sinergias y se sugirió la hipótesis de que los movimientos en que se involucran una o varias articulaciones

pueden ser entendidos en términos de dos clases fundamentales de sinergias: movimientos discretos y movimientos rítmicos. Estas dos unidades de acción se representan como un punto fijo y como un ciclo límite respectivamente en la dinámica del sistema y constituirán los dos estados estables principales de cualquier sistema dinámico no lineal. Ambos estados pueden existir de forma aislada o interactuando en tareas complejas. Sternad continuó investigando en esta línea provocando una interacción entre un movimiento cíclico y uno de traslación en un mismo miembro (Sternad et al., 2000). Para construir el modelo de la acción se consideró el movimiento rítmico un generador de patrón oscilatorio, y al discreto un atractor puntual. Ambos generadores de patrones pueden coexistir simultáneamente, pero se ejercen una inhibición mutua. Se produjeron oscilaciones durante el movimiento discreto, que pudieron ser replicadas en el modelo teórico utilizando estos dos generadores de patrones con un efecto inhibitorio.

Una extensión interesante para el ámbito deportivo del modelo HKB es la propuesta por Burgess-Limerick et al. (2001), que estudian una tarea en la que interviene todo el cuerpo: levantar y bajar un peso. Once sujetos realizaron esta tarea de forma cíclica siguiendo un protocolo en el que se modificaba la altura a la cual se encontraba el peso a levantar progresivamente. Se observó una transición espontánea entre dos patrones de coordinación cualitativamente diferentes: uno de flexión de rodillas del modo de la sentadilla y otro inclinando el tronco con menos flexión de rodillas. Cuando se bajaba la posición del peso, se producían transiciones del patrón inclinado al de sentadilla y a la inversa cuando se elevaba. Se produjo histéresis, ya que eran más frecuentes las transiciones en los periodos de descenso del peso, y se producía la transición en momentos diferentes, cumpliendo principios dinámicos demostrados en tareas mucho más simples.

Por último, incluimos en este apartado un estudio en el que el modelo HKB se aplica a una tarea en la que no hay movimiento, pero sí contracciones

isométricas de los miembros implicados. Carson (1995) demuestra como se producen los modos de coordinación en fase y en antifase en una tarea bimanual sin movimiento externo en la que ocho sujetos debían realizar contracciones isométricas de los antebrazos de pronación y supinación. En el patrón en fase, los sujetos debían sincronizar sus contracciones con las pulsaciones de un metrónomo, y en el antifase hacerlo con la derecha o con la izquierda. Se observaron pérdidas del patrón en el modo antifase a medida que la frecuencia del metrónomo aumentaba, aunque estas pérdidas eran de escasa duración y siempre se retornaba al modo antifase, es decir, no se produjeron bifurcaciones. No obstante, el patrón antifase es menos estable, se aplican fuerzas de menor magnitud y es más variable en cuanto a la frecuencia y a la magnitud que el patrón en fase. Siguiendo esta línea de investigación, Peper y Carson (1999) realizaron un nuevo experimento en el que un brazo realizaba contracciones isométricas y el otro anisométricas flexionando y extendiendo la muñeca. A pesar de que ambos brazos estaban influenciados por la tarea del otro, esta asimetría no parece influir en los patrones de coordinación que emergen, puesto que en este caso no se produjeron diferencias entre la estabilidad del modo antifase o en fase y no existió la relación entre la estabilidad y la frecuencia de movimiento. No obstante, ya hemos comentado como en otras tareas asimétricas sí que se cumplen los principios del modelo HKB, por lo que parece que existe un límite en la diferencia entre las tareas para que se produzca el acoplamiento de la forma descrita. Se requerirán más estudios sobre tareas asimétricas para comprobar si efectivamente es esto lo que sucede.

Estos estudios parecen ofrecer la evidencia de la existencia de una serie de principios que gobiernan los movimientos cíclicos entre diferentes miembros acoplados (Walter et al., 1993):

- Los atractores aparecen inicialmente en relaciones entre miembros en fase o en antifase, y mayoritariamente en ratios 1:1.

- A pesar de que las acciones son oscilatorias, Walter et al. (1993) afirman que los atractores pueden considerarse puntuales en el espacio fase, ya que la relación entre los dos movimientos es constante. Sin embargo, otros autores consideran que los atractores puntuales corresponden a movimientos discretos, mientras que las acciones oscilatorias rítmicas están regidas por atractores de ciclo límite (Sternad et al., 1998).
- Las acciones continuas de diferentes miembros también son atraídas hacia patrones espaciales similares.
- La frecuencia de la oscilación influye directamente en la fuerza del atractor.
- Las acciones que se realizan fuera de la fase relativa preferida presentan una mayor variabilidad

Una vez estudiado el fenómeno, se pasó a la intervención mediante la intención, abriendo todo un nuevo abanico de posibilidades para comprender los procesos de aprendizaje.

5.3- Aportaciones de la TSD en el aprendizaje motor

Desde la teoría general de sistemas (TGS) de Bertalanffy (1976) el concepto de aprendizaje se transformó en un acto dinámico en el que se producen complejidad de interacciones y en el que el alumno es el verdadero protagonista (Seirul.lo, 1992). Para entender las aportaciones que ha hecho la TSD a este concepto, es imprescindible tener en cuenta el pensamiento dominante en la época de su aparición.

5.3.1 - Las teorías sobre aprendizaje motor

El aprendizaje es el proceso de modificación de la conducta, un cambio estable de la conducta producto de la práctica. En el caso del aprendizaje motor, estos cambios hacen referencia a las conductas motoras. El estudio del comportamiento motor tuvo su origen en la dimensión motriz del comportamiento. A finales del siglo XIX, la investigación psicológica estaba centrada en la introspección, es decir, las habilidades se consideraban un simple acceso a la mente, una herramienta para comprender los procesos internos del sistema nervioso. Pero al inicio del siglo XX, las habilidades empezaron a ser por sí mismas un objeto de investigación. Creció el interés por las aplicaciones de este campo en la industria, con el objetivo de mejorar la eficacia de los operarios industriales y con ello la productividad. Se publicaron las primeras teorías sobre aprendizaje, emergieron los primeros trabajos sobre educación física, y autores como Bayley, Espenschade, McGraw y Shirley iniciaron la formación del área de estudio del aprendizaje motor (Schmidt, 1982). En la neurofisiología, Sherrington aportó el trabajo sobre los reflejos, considerando que la mayoría de nuestros movimientos voluntarios son resultado de ellos. Otros autores estudiaron el control neural de movimientos simples, pero no se unieron los conocimientos adquiridos sobre la coordinación de movimientos complejos con los adquiridos desde la neurología o la biomecánica. La excepción fue el genial Bernstein, que fue capaz de integrar el estudio de las nociones del comportamiento motor con el de la neurofisiología, la biomecánica y la anatomía, pero su obra no se conoció en el resto del mundo hasta finales de la década de 1960.

Después de la II guerra mundial, se impulsaron los estudios sobre aprendizaje para la mejora del rendimiento militar, a la vez que aparecieron las primeras teorías, como la teoría general de aprendizaje de Hull (1943). Se desarrolló la ergonomía y la influencia del concepto hombre-máquina determinó el progreso también en otros campos, apareciendo las ya explicadas cibernética y la teoría de la información. A mediados de siglo,

Fitts (Fitts y Posner, 1967) intentó aplicar los principios matemáticos para entender el movimiento humano, formulando la denominada ley de Fitts.

La psicología perdió parcialmente el interés por el comportamiento motor, a excepción de algunos autores como Bilodeau, Adams o Keele, pero la educación física y el auge del deporte a nivel social generó nuevos intereses en el campo del aprendizaje motor con el objetivo de optimizar el entrenamiento y la enseñanza del deporte.

La psicología cognitiva tuvo su gran influencia en la década de 1970, y la relación estímulo-respuesta dominante en todas las teorías del momento se modificó por la perspectiva del procesamiento cognitivo de la información. Hubo una transición en la orientación de la investigación de la tarea al proceso, centrándose en las acciones neurales o mentales que producen los movimientos. En estos años se desarrolló la teoría basada en el feedback de Adams (Adams, 1971), en 1974 Pew presentó ideas teóricas sobre esquemas de movimiento (Pew, 1974), y en 1975 Schmidt presentó la teoría del esquema (Schmidt, 1975). En ésta se defiende que el sujeto no almacena la información sensorial obtenida en cada movimiento, sino que la abstrae para formar un esquema o patrón general de movimiento (GMP). Es una perspectiva basada en programas motores, es decir, se considera que los movimientos son almacenados en la memoria en forma de programas motores y esquemas del movimiento. El concepto de programación motriz es de Adams, 1971, y Keele, 1968, siguiendo un paralelismo terminológico y conceptual al incipiente desarrollo de la informática y las teorías de la información. Schmidt propuso el programa motor generalizado o GMP que gobierna una clase de acciones caracterizada por características particulares invariantes como la secuencia de los elementos del movimiento, el timing relativo y las fuerzas relativas. Para acomodar el GMP a las demandas específicas del medio, los parámetros del movimiento como la duración total y la fuerza total se modulan mediante el esquema motor. El feedback sensorial se usa para modificar y ajustar el movimiento al programa motor (Wulf y Schmidt, 1988). Así, Schmidt considera dos tipos de esquemas: el

“recall schema”, responsable de la elección y producción de movimientos y el “recognition schema”, responsable de la evaluación y ajuste de la respuesta. El primero se formará mediante la relación entre el resultado de una acción y los parámetros del medio utilizados para su producción. El individuo utilizará esta relación establecida en el pasado con condiciones iniciales similares a la situación en la que se encuentre para seleccionar la mejor respuesta. Primero el individuo decide la respuesta determinando la naturaleza de las condiciones iniciales para posteriormente, con el “recognition schema”, estimar las consecuencias sensoriales que se darán si se produce el movimiento (Schmidt, 1982).

Una de las principales aportaciones de este modelo es que se propone la denominada práctica variable para optimizar el aprendizaje del esquema motor (Shea y Kohl, 1990; Schmidt, 1975). Desde esta perspectiva todo esquema motor se reforzará a través de la variabilidad de la práctica. Numerosos estudios demuestran la utilidad de la práctica variable en el aprendizaje de tareas, en la retención de éstas y en la transferencia a otras similares en diferentes tipos de individuos y de tareas (Moxley, 1979; Shea y Kohl, 1990; Wrisberg et al, 1987; Wulf y Schmidt, 1988;). No todos los estudios corroboran esta hipótesis, o lo hacen exclusivamente para determinados tipos de tareas. Por ejemplo, Eidson y Stadulis (1991) sugieren la utilización de la práctica variable para el aprendizaje de tareas cerradas (aquellas que pueden ejecutarse sin la respuesta directa del medio), pero no de tareas abiertas (con características impredecibles del medio, como el golpeo de una pelota lanzada por alguien). Lai y Shea (1998) tampoco corroboran la hipótesis de la utilización de la práctica variable para el desarrollo de un GMP, pero en cambio la consideran mejor para tareas de transferencia. Posteriormente, Lai et al. (2000) continúan investigando en esta línea y concluyen que, en una primera fase del aprendizaje, es preferible la práctica constante para desarrollar un GMP estable, y mejorar éste en una siguiente fase mediante la práctica variable. La metodología utilizada en los estudios también puede variar los resultados, ya que la estructura de las sesiones de práctica variable parece modificar el

aprendizaje logrado (Pigott y Shapiro, 1984). No obstante, parece demostrarse la efectividad de la práctica variable teniendo en cuenta ciertas premisas, especialmente para mejorar tareas ya estabilizadas. Esta variabilidad estará sujeta a un mismo esquema o GMP. Cuando la práctica conlleva variación de este patrón se denomina interferencia contextual, concepto que complementa la teoría del esquema. Se han realizado estudios para comprobar la eficacia de la práctica variable con la interferencia contextual y también se han obtenido mejores resultados que con la práctica constante (Carnahan y Lee, 1989; Hall y Magill, 1995; Magill y Hall, 1990; Shea y Morgan, 1979). A pesar de que la ejecución durante la práctica empeora, en los tests de retención los resultados son mejores cuando ha habido altos niveles de interferencia contextual. También se han mostrado resultados mejores cuando el test consistía en realizar un nuevo movimiento que no se había practicado antes (Magill y Hall, 1990).

Paralelamente la psicología ecológica (Gibson, 1979) sacó a la luz de nuevo las ideas de Bernstein y se criticó la existencia de programas motores, tal y como se ha comentado anteriormente. Se enfatizó la idea de que el sistema motor se creó mediante la evolución y las interacciones con las características físicas del medio. El enfoque de Gibson será contrario al de Schmidt, y evolucionó gracias a la inclusión del concepto de la autoorganización. Otras propuestas en psicología, como la psicología interconductual, también consideran que la psicología ha de investigar los cambios en las interacciones del organismo total con su medio ambiente físico, biológico y social, y considera al aprendizaje como un proceso de establecimiento de interacciones (Riera y Gordillo, 1983; Riera, 1985). Algunos autores de nuestro país consideran este enfoque de la psicología como el más adecuado para el deporte, ya que la psicología del deporte ha de estudiar todas las interacciones que se den en las situaciones deportivas en el presente y en el pasado del sujeto (Cruz y Riera, 1991).

Se crearon así las bases para desarrollar la perspectiva del aprendizaje que se explica a continuación y para que ésta pudiera extenderse en las diferentes áreas relacionadas con la actividad física y el deporte.

5.3.2- El aprendizaje de acciones motrices desde la perspectiva de la TSD

En el modelo HKB, se pedía a los sujetos participantes que no intervinieran voluntariamente en el cambio de patrón motor, evitando por tanto la participación de la intención, condicionante imprescindible en los procesos de aprendizaje. De hecho, ésta será la característica que distinguirá a la coordinación biológica de la de los sistemas inanimados, la presencia de la intención, de la consecución de un objetivo.

Al continuar investigando en la línea explicada en el apartado 5.2, se propuso la participación de la intención para aprender un nuevo patrón que en un principio no atraía el sistema, no era un atractor en su dinámica intrínseca. Scholz y Kelso (1990) demostraron que la manipulación de la intención podía modificar la dinámica de la coordinación, e incluso evitar la transición bajo determinadas condiciones. En otro estudio de Zanone y Kelso (1992), los sujetos debían practicar el movimiento de los dedos con una relación fase de 90° , y, después de cinco días de práctica, este patrón coordinativo presentó las características de un atractor. Se había modificado así la distribución de los atractores. Se ve de esta forma un cambio en el concepto tradicional del aprendizaje, que pasará a ser una modificación específica de algo que ya existe en los modelos de comportamiento en la dirección de la tarea a aprender. No es que vaya cambiando el comportamiento, sino que toda la distribución de los atractores se modifica y se reconstruye (se pasa de un estado organizado de un sistema a otro). En el experimento de Zanone y Kelso, el aprendizaje fue consecuencia de dos cambios específicos de la dinámica de la coordinación: uno fue producto de

la competición contra los atractores intrínsecos; y el otro de la reducción de la influencia de los patrones intrínsecos sobre el que se pretendía aprender, permitiendo el reforzamiento de este nuevo atractor. Los autores sugirieron que el atractor previo desaparecía del espacio fase, ya que se perdía rendimiento en los patrones que previamente eran más estables, aunque esta afirmación ha sido discutida posteriormente. No obstante, Zanone y Kelso especificaron que la transición de fase ocurriría siempre en función de la relación que existiese entre la dinámica intrínseca y la dinámica de la tarea a aprender. De hecho, las transiciones de un patrón antifase a uno en fase fueron más rápidas que las opuestas, tal y como demostraron también posteriormente Carson et al. (1996) con una tarea de pronación-supinación. Esta relación también determinará, según los autores, la dificultad del aprendizaje.

Lee et al. (1992) realizaron un estudio en el que varios sujetos aprendieron una tarea de coordinación bimanual en la que los dos brazos se movían a la misma frecuencia pero con diferentes amplitudes y con una relación fase de 90°. Éste patrón no atraía al sistema, y además se añadía la dificultad de la variación de amplitudes. Obtuvieron resultados similares a los de Zanone y Kelso, pero observaron que la pérdida de capacidad o rendimiento al realizar el patrón que previamente atraía al sistema se recuperaba a los dos días, indicando un efecto sólo temporal.

Los modelos resultantes debidos a los cambios en los parámetros específicos y su estabilidad dependerán de cómo la información específica de comportamiento coopera o compite con las tendencias de coordinación de la autoorganización espontánea (mecanismo de selección). Según Bernstein (1967), el aprendizaje implica una inicial congelación de muchos grados de libertad. Mientras progresa el aprendizaje, estos iniciales grados de libertad suprimidos son captados dentro del modelo de coordinación, de forma que la habilidad aprendida se vuelve más flexible y adaptable a las condiciones cambiantes del medio. Vereijken et al. (1992) observaron como esquiadores noveles inmovilizaban las articulaciones de las piernas y el

torso (grados de libertad suprimidos), pero al progresar, se observó un gradual incremento en la amplitud de estos componentes (recaptación de grados de libertad). Delignières et al. (1998) también observan una tendencia similar al estudiar la ejecución de una tarea gimnástica de balanceo en las barras paralelas en sujetos expertos y en noveles. Estos últimos presentaban una sincronización en fase 1:1 entre las oscilaciones pendulares y las verticales del centro de masas del cuerpo. En cambio, los expertos presentaban una frecuencia 2:1, patrón que permite aprovechar al máximo la gravedad durante la parte descendente del balanceo y disminuir la resistencia del peso durante la parte ascendente al reducir el momento de fuerza que genera el centro de masas del cuerpo alrededor de las manos. Temprado (2000) también muestra un patrón de coordinación en fase entre las articulaciones del hombro, codo y muñeca en el saque de voleibol en jugadores noveles que no se observa en jugadores expertos, aunque este tipo de tareas se explicará en el apartado dedicado a las tareas no cíclicas o discretas (véase apartado 5.4).

El sistema nervioso central (SNC) recluta y suspende espontáneamente grados de libertad de forma flexible para conseguir el objetivo específico de la tarea (Buchanan y Kelso, 1999). El SNC se caracterizará por su naturaleza multifuncional, lo que sugiere la posibilidad de que se pueda conseguir el mismo objetivo utilizando “ejecutores” distintos. Bernstein ya observó esta característica analizando círculos dibujados bajo condiciones distintas pero que conservaban la misma forma. Un mismo sujeto mantendrá la forma de la figura dibujada a pesar de que, por ejemplo, cambie el tamaño de ésta, lo cual implicará a músculos y articulaciones distintos (Georgopoulos, 1998). Lo mismo sucede con la escritura, que mantiene características invariantes a pesar de que se haga con la mano derecha o izquierda o incluso con otras partes del cuerpo (Kelso, 1997), o con la producción del habla (Kelso y Tuller, 1984). Esta idea nos lleva a un concepto muy utilizado no sólo en el aprendizaje motor sino también en el entrenamiento deportivo: la transferencia. Sin embargo, a pesar de que se utilice el mismo término en el estudio de la dinámica coordinativa que en la

teoría del entrenamiento clásica, no son sinónimos, ya que en el entrenamiento se suele interpretar bajo un enfoque totalmente cognitivo (véase apartado 8.4).

Utilizando otra tarea basada en la relación fase existente entre el movimiento de los diferentes miembros, Kelso y Zanone (2002) estudiaron la posible transferencia de un aprendizaje de un movimiento ejecutado por los brazos a las piernas o a la inversa. Dieciocho sujetos participaron en este estudio divididos en tres grupos de seis: Un grupo que aprendió la tarea con las piernas, otro con los brazos y un grupo control. Se analizó previamente la dinámica intrínseca de cada sujeto y se escogió una relación fase individual para aprender entre los miembros que no coincidía con los atractores que ya disponía el sujeto. Se realizaron 20 intentos ejercitando la sincronización con un metrónomo dos días consecutivos. Se analizaron las diferencias entre la ejecución previa al aprendizaje y la posterior tanto de los brazos como de las piernas. Se observó como la transferencia en el aprendizaje ocurría espontáneamente en ambas direcciones, de piernas a brazos o a la inversa. El aprendizaje produjo modificaciones de la dinámica de coordinación de ambos sistemas ejecutores, y el patrón aprendido se convirtió en un atractor nuevo de la dinámica de coordinación de éstos. También se observó cómo la forma de la dinámica intrínseca determinaba la forma de aprender. Es decir, el sujeto que poseía una dinámica intrínseca biestable (la relación en modo fase y en modo antifase atrae al sistema) aprendía el nuevo patrón a la vez que desestabilizaba el estado atractor previo (se produjo más variabilidad y el patrón aprendido presentó una desviación estándar menor). El sujeto que poseía una dinámica intrínseca multiestable (también le atraía la relación en fase de 90°) aprendió el patrón nuevo sin modificar prácticamente la dinámica anterior. Kelso y Zanone sugieren que este experimento muestra que el patrón se aprende bastante independientemente del sistema ejecutor, lo que significará que hay una equivalencia motriz. El SNC no dará un orden de comportamiento a los componentes individuales, sino que el sistema complejo exhibirá una serie de estados coordinativos atractores. Por ello la experiencia en tareas similares puede resultar determinante en el

aprendizaje (Verheul, 2004). Se integrará la información de muchas fuentes que condicionarán el comportamiento, tales como la percepción, las experiencias previas, el movimiento en sí o la intención del sujeto.

Hodges y Franks (2002) continuaron investigando el aprendizaje de la misma tarea para determinar qué tipo de instrucciones eran más favorables al aprendizaje en función de las características individuales. El resultado fue que las instrucciones no eran favorables ni a los sujetos biestables ni a los multiestables. Los autores sugieren que se deben evitar las instrucciones y las demostraciones, como mínimo si éstas se refieren al movimiento en sí, en el momento de aprender una tarea nueva compleja y consideran que el feedback puede ser suficiente. Wulf y Prinz (2001) también estudiaron el efecto de las instrucciones en el aprendizaje, y observaron que eran más efectivas aquellas que afectan a los efectos de la acción sobre el medio, y no a las que afectan al movimiento en sí.

Basándose en estos estudios de sencillos movimientos, Kelso (1999) considera que la modificación de modelos de coordinación de tareas específicas puede coger tres formas:

- Cambio de modelo entre estados de coordinación absoluta. Cuando el modelo cambia por pérdida de estabilidad se dice que el comportamiento se autoorganiza.
- Inicio de coordinación relativa – intermitencia (el sistema se queda cerca del punto crítico donde puede cambiar espontáneamente). La tendencia de sincronizarse y el conflicto entre mantener un radio específico de frecuencia o acoplarse a una frecuencia impuesta hace que se salte entre radios de frecuencia y fases. A bajas frecuencias, la atracción será en fase o antifase, a medias sólo en fase, y a altas en ningún modelo concreto.

- Reclutamiento espontáneo de grados de libertad previamente pasivos y supresión de grados de libertad previamente activos. Por ejemplo, en el modelo bimanual, a una determinada frecuencia se pasa de un modelo asimétrico a uno simétrico, pero a más frecuencia se pasa del plano x al y, tanto empezando por un modelo de coordinación simétrico como asimétrico.

Con relación al último punto, Buchanan y Kelso (1999) demostraron este proceso con el balanceo de un péndulo mediante el movimiento de la muñeca de una mano o de dos (uno en cada mano). Existieron dos tipos de transiciones del plano horizontal al vertical: transiciones rotacionales, caracterizadas por la gradual supresión del movimiento en el plano x al y; y transiciones abruptas, caracterizadas por un salto instantáneo del movimiento horizontal al vertical. A frecuencias por encima de la “natural” (eigenfrequency) el movimiento elíptico se observó a la vez que se empezaba a flexionar y extender el codo. El SNC recluta diferentes grados de libertad para ayudar a la conducción de un péndulo y lo hace de forma global, es decir, el SN es capaz de realizar procesos de reclusión y supresión para conseguir objetivos en tareas específicas.

En resumen, los procesos de adquisición de nuevos patrones coordinativos se pueden producir principalmente siguiendo dos rutas distintas en función de la dinámica intrínseca del sujeto y de su relación con la dinámica de la tarea a aprender: una ruta de bifurcación, donde se crea un nuevo patrón de coordinación, y una ruta de cambio, donde un patrón preexistente se modifica hacia la tarea requerida. Estas rutas se observan en los sujetos exhibiendo dinámicas biestables (ruta de bifurcación) o multiestables (ruta del cambio) (Jouhet et al., 2003; Kostrubiec y Zanone, 2002; Zanone, 2003). Ambos procesos se producirán en respuesta a una pérdida de estabilidad, por la interacción de los condicionantes musculares e informacionales (Milliex et al., 2003).

Se han valorado en multitud de tareas todos los principios aplicados al modelo HKB, como es el caso del análisis de las fluctuaciones o del tiempo de relajación que se producen en el movimiento. Serán estos parámetros los que se utilizarán para valorar la estabilidad del movimiento y como consecuencia servirán como medida del aprendizaje. Schmidt et al. (1992) estudiaron el aprendizaje de la oscilación de dos péndulos (uno en cada mano) con una frecuencia de 2:1 durante 12 sesiones, y encontraron efectivamente una reducción de las fluctuaciones y de la desviación de la frecuencia escogida a lo largo del periodo de práctica. Teniendo en cuenta estos resultados, podemos suponer que la medida de las fluctuaciones puede ser una medida de la estabilidad de un aprendizaje o de la dificultad que presenta la tarea para el sujeto.

También se ha valorado en este tipo de experimentos la contribución que tiene en el aprendizaje los condicionantes propios del sistema (correspondientes al sistema neuromuscular-esquelético) y los propios de la tarea o del ambiente. En este sentido, Carson et al. (1996) valoraron la influencia de la frecuencia del movimiento y de la presencia de una señal externa auditiva en diferentes momentos de una tarea de pronación y supinación rítmica del antebrazo. El aumento de la frecuencia del movimiento producía un descenso lineal de la duración de las transiciones que se daban. También producían una reducción de la duración de las transiciones el que fueran en la dirección del modo antifase al modo en fase, en vez de a la inversa. Las transiciones en cambio eran de mayor duración con la presencia de la señal auditiva externa.

La actividad cognitiva en sí será otra variable que influenciará el resultado de la tarea, y recientemente se ha valorado la influencia de esta actividad en los atractores del sistema. Pellecchia y Turvey (2001) propusieron balancear rítmicamente dos péndulos coordinando los dos brazos de los sujetos en fase o en antifase, siendo la fase relativa la variable de mayor importancia. Para añadir actividad cognitiva, los sujetos debían de realizar cálculos a la vez que movían los péndulos. Diferentes experimentos a distintas

frecuencias impuestas o seleccionadas por los sujetos y con la actividad cognitiva o sin ella sugirieron que las desviaciones absolutas del patrón de movimiento en fase o en antifase se ampliaban cuando se añadía la dificultad cognitiva. Se produce así un cambio en los estados atractores, y éste es independiente de la velocidad del movimiento o del modo de coordinación.

Posteriormente, Temprado et al. (2002) estudiaron si la dificultad cognitiva podía disminuirse con la práctica, estudiando como ésta influye en una tarea cíclica combinada con una discreta. Cinco sujetos ejecutaron un patrón coordinativo bimanual en modo antifase a diferentes frecuencias mientras en cada intento debían reaccionar a una señal auditiva apretando unos botones con los pies lo más rápido posible. Se realizó un test inicial, uno intermedio después de 60 intentos de práctica, uno final después de 60 intentos más y un test de retención después de 7 días. Con la práctica hubo efectivamente una mejora significativa en cuanto al número de transiciones al modo en fase, hubo un incremento de la frecuencia con la que podían mantener la coordinación antifase y se produjo una menor variabilidad en cuanto a la fase relativa entre las dos manos. En cambio, el tiempo de reacción a la tarea discreta sólo se disminuyó significativamente en el test de retención, sugiriendo que a pesar de que este parámetro sea entrenable, no tiene por qué evolucionar de forma simultánea a los parámetros coordinativos.

Paralelamente, los estudios sobre coordinación se han ampliado rápidamente a movimientos más complejos, ya más relacionados con las actividades deportivas.

Broderick y Newell (1999) observaron los patrones de coordinación de personas de diferentes edades botando una pelota con el objetivo de estudiar el problema de los grados de libertad propuesto por Bernstein. Los resultados del estudio mostraron que los más expertos eran menos variables realizando la tarea, aunque tuvieran a su vez más capacidad de adaptación de la tarea a los condicionantes externos. Con la experiencia, se redujeron

los grados de libertad virtuales hasta uno, hasta organizar las articulaciones participantes en la tarea en una unidad. Sternad (1999) estudió una tarea similar, el bote de una pelota sobre una raqueta de tenis. El movimiento continuo de la mano que sujetaba la raqueta se interpretó como el movimiento de un oscilador no lineal (de la misma forma que en el modelo HKB) y se realizó un análisis dinámico para encontrar los estados estables y las preferencias intrínsecas.

Debido a la dinámica intrínseca del sistema, será más difícil enseñar una tarea en la que los movimientos de los miembros no sean simétricos (es decir, un movimiento en modo antifase) que a la inversa (en fase). Esto es lo que intentaron Walter y Swinnen (1992), y lo consiguieron realizando la estrategia inversa a la propuesta por la tarea del modelo HKB. El aumento de la frecuencia producía una transición del movimiento en modo antifase al modo en fase, de lo que se deduce que el bajar la frecuencia facilitará el aprendizaje de la transición inversa. A medida que se va progresando, se irá aumentando la frecuencia de los movimientos. El parámetro no tiene por qué ser la frecuencia, pero es ésta una estrategia muy utilizada para aprender movimientos deportivos. Se realiza primero a menor velocidad y se va incrementando a medida que progresa el aprendizaje.

Otro grupo de tareas asimétricas muy utilizado para observar las características del aprendizaje dinámico es el de los juegos malabares (Sternad, 1999). Es una tarea compleja en la que no se puede conocer la dinámica intrínseca del sistema puesto que en un principio el sujeto no es capaz de realizarla. Beek y van Santvoord (1992) observaron cómo los sujetos descubrían las características invariantes o puntos fijos del espacio, desde los cuales podían haber pequeñas fugas sin que se perdiese el movimiento. Se conseguía así estabilidad a la vez que adaptabilidad y flexibilidad. Se analizó todo el proceso y las fases del aprendizaje desde el punto de vista de la TSD, por lo que fue posible modelizar la tarea en términos de distribución y cambio de atractores.

En la mayoría de estudios citados se enfatiza el estudio de las características invariantes de la organización del movimiento, aunque las variaciones ya no se consideren ruido o producto del azar. Newell et al. (2000), en cambio, se plantearon la producción de movimientos aleatorios como tarea. Se pretendía examinar cómo los sujetos pueden aprender a aumentar las propiedades aleatorias de un movimiento, concretamente la oscilación en el plano horizontal de los dedos índices, a través de la práctica y con condiciones diferentes de feedback (con y sin). Se les pidió que realizaran el máximo número de combinaciones posible de velocidades y de rango de movimientos durante 5 días de práctica, y los resultados mostraron que este objetivo no se consiguió. Se sugirió como causa la gran restricción que existe en un movimiento tan simple, aunque los sujetos no utilizaron todo el rango de amplitudes y frecuencias que podrían haber usado. Parece que el aprendizaje de una tarea de este tipo es más difícil que el aprendizaje de movimientos regulares, y que la presencia o ausencia de feedback es, a diferencia que en la mayoría de estudios, una variable no influyente.

Esta concepción del aprendizaje y del control motor representa una clara evolución con relación a la perspectiva del programa motor o a la idea del GMP. Kelso (1997) destaca como concepto similar el “timing” relativo, ya que en las primeras teorías se consideraba a esta característica como una propiedad invariante o prácticamente invariante de las acciones gobernadas por el GMP, mientras que en la perspectiva dinámica, el “timing” relativo es relevante para explicar la estabilidad temporal, lo que no será sinónimo de invariancia. Las diferencias provienen de la experimentación surgida a raíz de la perspectiva dinámica y que muestran la estabilidad de los patrones coordinativos a la vez que su flexibilidad en función de los componentes que actúan y sus propiedades biomecánicas. También se ha demostrado que la estabilidad temporal puede perderse cuando ciertos parámetros varían y que también puede mantenerse a pesar de que se recluyan o se supriman grados de libertad, como ya se ha comentado anteriormente. La perspectiva dinámica enriquece la anterior al incluir propiedades que no pueden explicarse con la teoría de la programación motriz, como son las siguientes:

- Las fluctuaciones, que predicen el cambio entre estados de coordinación. Este concepto se relaciona con la estabilidad y la desestabilización de un patrón, característica de la dinámica de la coordinación autoorganizada, pero no de los GMP. Las variaciones ya no se consideran errores de la respuesta del programa motor, sino que tienen un rol constructivo.
- El tiempo de relajación y el critical slowing down, que muestran como los atractores presentan diferentes grados de estabilidad y cómo se ven afectados por las perturbaciones. Estos fenómenos también son difícilmente explicables si la coordinación depende de la existencia de programas motores.
- Las transiciones de fase y las bifurcaciones, que no se describen cuando se explican los GMP.
- La multiestabilidad y la histéresis. La presencia de más de un atractor en un sistema sometido a las mismas condiciones sólo podría explicarse bajo el punto de vista de la programación motriz si pudiesen haber varios programas motores para una misma tarea o fenómeno.
- El descubrimiento de ecuaciones que describen el movimiento que gobiernan el comportamiento de diferentes estructuras en tareas similares pero en condiciones o mediante componentes distintos

La fructífera investigación que se ha llevado a cabo durante más de veinticinco años ha permitido que investigadores con gran diversidad de formación buscasen todo tipo de explicaciones a estos fenómenos. La visión dinámica contrasta con otra más cognitiva, aunque no basada en la programación motriz. Un representante de esta última es Mechsner

(Mechsner, 2004a), que defiende que todos los resultados de los estudios sobre la dinámica de la coordinación pueden explicarse bajo la perspectiva psicológica o perceptivo-cognitiva. En dicha perspectiva, se defiende que los movimientos se organizan en función de la percepción y que las órdenes motoras se ejecutan automáticamente correspondiendo a esta percepción. Es decir, los movimientos voluntarios se organizan mediante la representación de objetivos perceptivos, mientras que la actividad motora es espontánea y flexible para satisfacer esa necesidad. Por ejemplo, mediante varios experimentos en los que modificó la tarea de coordinación bimanual de Kelso, el autor mostró como la emergencia espontánea de movimientos simétricos no es fruto de la activación de músculos homólogos, sino por la percepción de la simetría espacial (Mechsner et al., 2001). También mostró como unos sujetos aprendían un patrón de movimiento de frecuencia 4:3 gracias a la ayuda del efecto que este movimiento producía sobre unas banderas que veían los sujetos. Según Meschner, los defensores de la visión dinámica postulaban que la producción de movimientos con frecuencias no armónicas es imposible con sujetos inexpertos, y este experimento muestra como una ayuda perceptiva lo consigue. La visión de Mechsnner ha sido profundamente criticada por su poca clarividencia para explicar el concepto de “perceptivo-cognitivo” (Walter y Gravenhorst, 2004); por la falta de consistencia o por afirmaciones poco contrastadas como la referente a la generación de movimientos con frecuencias no armónicas (Franz, 2004); y por su omisión de estudios en los que se muestra la influencia de condicionantes de diferente naturaleza que no pueden ser explicados con esta perspectiva psicológica (Amazeen et al., 2004; Beek y Peper, 2004; Jirsa, 2004; Summers, 2004; Swinnen et al., 2004; Temprado y Salesse, 2004). Todos estos autores defienden que los factores perceptivos y cognitivos son muy importantes para la generación de movimientos, pero a su vez consideran que los condicionantes neuromusculares y su interacción con el medio no pueden ser obviados. No obstante, Mechsnner justifica su postura (Mechsner, 2004b), ya que algunos críticos no han tenido en cuenta que la percepción no es sólo visual, sino también auditiva o propioceptiva, aspecto éste muy importante para poder justificar algunos de los resultados

experimentales en los que, por ejemplo, la simetría emergía con ausencia de visión. Otro aspecto importante a destacar de la visión de Mechsner es que considera que los condicionantes actuarán siempre y cuando los sujetos perciban la información que dan esos condicionantes (Mechsner, 2004b). Esta afirmación la consideramos muy relevante para tenerla en cuenta al diseñar tareas de aprendizaje, aunque no parece contradecir las teorías de la percepción-acción o de la coordinación dinámica. Recordemos sino la teoría de Wimmers et al. (1992), que defendía que las transiciones ocurren si en el nuevo patrón los objetivos de la tarea pueden ser satisfechos con unos costes informacionales más bajos. Al margen de la controversia que se ha generado por las publicaciones de Mechsner, la investigación no ha hecho más que cosechar otras pruebas que evidencian la respuesta global del organismo y la interacción de multitud de factores que intervienen en la emergencia espontánea de patrones motores. La diferencia más remarcable entre las dos visiones es, en nuestra opinión, que la psicológica considera que todos los condicionantes dependen en última instancia de la percepción, mientras que la dinámica considera que, aunque la percepción es prioritaria, los condicionantes biomecánicos o del entorno pueden resultar insalvables e imponerse a los condicionantes perceptivos.

5.3.3- El aprendizaje durante el desarrollo motor

Los conceptos que se han usado para describir las características de los movimientos coordinativos y de su aprendizaje pueden ser aplicados también para comprender el desarrollo motor. Los conceptos de estabilidad, inestabilidad, transición, dinámica intrínseca o autoorganización son frecuentes ya en numerosos estudios sobre desarrollo. A su vez, estos estudios han influido en la investigación sobre aprendizaje que se ha explicado en el apartado anterior.

Se considera que los movimientos de los niños no son sólo producto de la acción del SNC, sino también de las propiedades energéticas y

biomecánicas del cuerpo, de la influencia del medio y de los objetivos de la tarea, y que las relaciones entre ellos no serán jerárquicas sino autoorganizadas y no lineales (Thelen et al., 1996). La realización una tarea nueva por un niño se interpreta como una transición, y para que se produzca se habrá pasado necesariamente por un periodo de inestabilidad. Ejemplos de estas tareas son el aprendizaje del alcance de objetos o la producción de patrones locomotores.

Una de las figuras más conocidas de este campo es Esther Thelen. Dicha autora y sus colaboradores (Thelen y Smith, 1998) aplican la TSD para explicar el crecimiento y el desarrollo motor porque considera que el resto de teorías que se utilizan son descriptivas pero no explicativas, y que suelen obviar la participación de la intencionalidad. Centran su teoría en el proceso y en la formación de atractores estables a base de la repetición de patrones de actividad. Los niños descubren la acción y las categorías de los objetos a través de las múltiples experiencias con ellos, que serán la causa y no el producto. Difiere radicalmente de la visión de Piaget, que asume que las modalidades sensoriales son diferentes y separadas, y que los reflejos forman parte del inicio de posteriores funciones motoras. Thelen defiende que hay separación y divergencia de información sensorial en muchas áreas funcionales, pero que están conectadas y la tarea del niño en el desarrollo no será la de construir, sino la de seleccionar de múltiples posibilidades de asociación. Se considera al movimiento como percepción y como un factor crítico en el desarrollo, y que actúa como parámetro de control. El desarrollo no se ve como un proceso inevitable consecuencia de horarios genéticos de la maduración del cerebro, sino como una serie de contingencias y tareas.

Cuando un niño está discapacitado para aprender sobre una modalidad del mundo, el sistema es capaz de encontrar otras modalidades, se observa una reorganización, y lo que cuenta no será el modelo, sino la solución del problema. Se crean nuevos patrones, que a su vez imponen condicionantes diferentes. Si se favorece la oportunidad para explorar se facilita la reorganización, ya que la exploración facilita la formación y estabilización de

grupos neuronales. Un ejemplo de este proceso de exploración y selección lo proponen Goldfield et al. (1993), estudiando como los niños aprenden a botar sobre un saltador. Ocho niños aprendieron la tarea explorando las relaciones entre sus acciones y las consecuencias de éstas. A través del uso de información multisensorial, los niños aprendieron cómo y cuándo producir extensiones simultáneas de las piernas para conseguir botar de forma continua y efectiva.

Thelen tampoco está de acuerdo con la existencia de generadores centrales de patrones o con los programas motores, ya que éstos producen patrones fijos que no se adaptan a la constante variabilidad del medio. Podrían explicar el orden global pero no los detalles locales. La TSD, en cambio, explica como el orden global y la variabilidad local son el mismo fenómeno. En sus primeras investigaciones, analizó el pataleo de los niños, que se da de forma espontánea en multitud de situaciones. Este patrón podría ser un ejemplo de un movimiento controlado por un generador central de patrones, pero, al realizar una electromiografía superficial, se detectó que el patrón alternativo observado no se daba en la activación muscular. Se producía una contracción simultánea de los flexores y los extensores, pero los flexores se contraían con más fuerza, y el inicio del movimiento parecía una consecuencia de la gravedad y de las propiedades elásticas de las piernas de los niños. La energía potencial elástica almacenada por los músculos y tendones en la pierna durante una flexión vigorosa, combinada con la acción de la gravedad, servía para extender la pierna de nuevo. Por ello se consideró a esta acción un ejemplo de dinámica autoorganizada, resultado de la interacción del sistema neuromuscular con los condicionantes particulares del medio y la energética.

Se considera que en el desarrollo habrá periodos estables y otros de transición en los cuales el comportamiento es más inestable y fácil de ser modificado (Thelen et al., 1996). De la misma forma que en las zonas de transición entre dos atractores, como es el caso del patrón bimanual en fase y en antifase, se producen fluctuaciones y por tanto un aumento de la

variabilidad, se produce lo mismo en otras escalas temporales. Aprender a hablar, a caminar, a correr... estará caracterizado por el paso de un estado estable a otro pasando por periodos de transición inestables. Éstos serán imprescindibles y permitirán al sistema reorganizarse, cambiar de un patrón a otro. La variabilidad, las fluctuaciones, no pueden ser consideradas ruido o desviaciones de un patrón ideal, sino un índice de la fuerza del atractor y un fenómeno deseable y eficaz en el aprendizaje o en el desarrollo. En estos periodos, el sistema es más influenciado por las perturbaciones, por lo que se puede aprovechar para enseñar tareas de forma más fácil. No obstante, se deberán escoger aquellas perturbaciones que cambien los patrones en la dirección deseada, y evitar aquellas que no tengan efecto o que puedan interrumpir la habilidad del sistema para realizar la tarea.

La variabilidad ha servido también para evaluar las diferencias entre niños de distintas edades y adultos. Los niños muestran más variabilidad ejecutando patrones de coordinación que son estables en los adultos (Fritzpatrick et al., 1996; Guarrera-Bowlby y Gentile, 2004; Robertson, 1999) y se detecta una evolución decreciente en esta variabilidad (Hausdorff et al., 1999). Robertson (2001) estudió a niños de 4, 6, 7, 8 y 10 años y a adultos ejecutando una tarea bimanual de dibujo de círculos a la medida y modo de coordinación preferidos. Los niños de 4, 6 y 7 años realizaron círculos más grandes y de más duración que los más mayores, demostrando que poseen una dinámica intrínseca diferente. También mostraron más variabilidad permaneciendo más tiempo en los patrones menos estables de coordinación, manifestando una mayor desviación estándar de la fase relativa, y produciendo más transiciones entre modos de coordinación. Robertson alude a la atención como una variable potencial para explicar la menor estabilidad de la coordinación bimanual en los niños (Robertson, 1999, 2001).

También la experiencia será un factor fundamental, como lo demuestra Angulo-Kinzler (2001) estudiando el aprendizaje en niños de tres meses de una tarea de extensión de piernas con el refuerzo de un móvil. Se aprendía

primero con una pierna, y la transferencia a la otra se producía con mucha mayor rapidez. También Guarrera-Bowlby y Gentile (2004) consideran a la práctica fundamental para estabilizar cualquier movimiento, estudiando concretamente la tarea de levantarse. Dichos autores comparan la ejecución de esta tarea por niños de 6 y 7 años con la ejecución por adultos, y observan que a pesar de que el movimiento en ambos grupos es similar su consistencia fue menor en el grupo de niños. Se realizó un análisis cinemático del movimiento repetido 10 veces por cada sujeto y se observó que no había diferencias significativas entre los dos grupos en cuanto a los valores medios obtenidos, pero en cambio sí que había diferencias significativas en cuanto a la variabilidad intrasujeto, siendo prácticamente dos veces mayor en los niños que en los adultos. Corbetta y Bojczyk (2002) son otros autores que aluden a la participación de la experiencia para explicar la transición que ocurre en los niños durante el primer año a la hora de coger objetos con una o dos manos, en función del control del equilibrio que tuvieran.

Para sugerir modos de aprovechar las fases de inestabilidad o de mayor variabilidad, Thelen realiza multitud de experimentos con niños y por ejemplo observa que “caminan” con la ayuda de cintas rodantes o con menos peso (en el agua) en edades que teóricamente no les correspondería. Aproximadamente a los dos meses, los niños pierden aparentemente la habilidad de realizar movimientos alternativos en la posición vertical, a la vez que se producen importantes cambios en la composición corporal y de ganancia de peso. Se demuestra que no es consecuencia de cambios del sistema nervioso al disminuir el peso de los niños sumergiendo la mitad de su cuerpo en agua. Interviniendo en el medio, los niños son capaces de caminar incluso de forma más “madura”, con patrones que se dan a una edad más adulta. Mediante la práctica y manipulando el medio progresivamente (por ejemplo aumentando la velocidad de la cinta), observó que los niños aprendían antes que sin esta ayuda, y que el incremento en la ejecución de esta habilidad está inversamente relacionado con la estabilidad del patrón: cuanto más inestable era, más aprendían los niños. Los efectos

de la práctica estaban así completamente influenciados por la dinámica intrínseca, que continuamente interactuará con el patrón aprendido, y el paso por inestabilidades favorecían el aprendizaje (Corbetta y Vereijken, 1999).

La ayuda de la cinta posibilitó este aprendizaje, mostrando la influencia del medio, de los factores extrínsecos. Siguiendo esta línea, Ulrich et al. (1998) realizaron un estudio con niños de 13 meses con síndrome de Down en el que analizaron su forma de caminar sobre una cinta rodante en un periodo de transición. Se manipuló el medio utilizando velcros, pesos, cinturones y diferentes superficies y se demostró que se reproducían patrones más efectivos de caminar que en condiciones normales demostrando así la intervención de los factores extrínsecos en estos periodos de transición. Angulo-Kinzler (2001), tal y como se ha citado anteriormente, también investigó la influencia de factores extrínsecos en niños de 3 meses, forzando su comportamiento mediante el uso de móviles infantiles que sonaban cuando el niño realizaba un determinado movimiento con sus piernas. Los niños fueron capaces de incrementar su frecuencia de movimiento para conseguir que los móviles se movieran.

Otra tarea estudiada por Thelen et al. (1993) es la de alcanzar objetos, para lo que primero captura la dinámica intrínseca estudiando las series temporales de los movimientos espontáneos de los brazos que realizaban los niños antes y después de la acción. Se observó a 4 niños que mostraron una enorme individualidad existente en esta dinámica, y la gran influencia de ésta sobre la formación de las trayectorias. Se siguió el proceso de aprendizaje y las dificultades que tenía cada niño en este proceso, y se vio que los cambios que sufría su dinámica por transformaciones propias del desarrollo eran fundamentales. Debían aprender a controlar las fuerzas reactivas generadas que se modificaban con su crecimiento. Los autores sugirieron que el progreso estaba relacionado con la calibración de estas fuerzas intrínsecas en función del objetivo específico.

Con el estudio del aprendizaje de estas tareas, se modifica la forma de entender el aprendizaje durante el desarrollo motor. La solución final no tiene porqué ser conocida de antemano por el aprendiz, sino que emergerá en un proceso de descubrimiento gradual por las complejas interacciones entre los componentes del comportamiento y la tarea. La práctica o la exposición a determinadas condiciones ambientales facilitará el aprendizaje, aunque éste siempre estará en función de la dinámica intrínseca del sistema. Estas dos afirmaciones contrastan con la práctica basada en la observación de una solución impuesta o en la repetición de una respuesta que se supone que es la ideal y la misma para todos, por lo que desde esta perspectiva se ofrecen nuevas posibilidades y formas de aprender.

El aprendizaje por descubrimiento es un ejemplo de esta propuesta, en el que el profesor o entrenador no dará unas instrucciones o un feedback preciso, sino que reducirá el número de grados de libertad que el alumno debe controlar. Por ejemplo, para que un niño aprenda a caminar, se le sujetará para facilitarle la estabilidad, o se le pondrá sobre una cinta rodante para que el medio le ayude a mover las piernas en la dirección del aprendizaje tal y como se ha explicado anteriormente (Vereijken y Whiting, 1990). Corbetta y Vereijken (1999) proponen la exposición del niño a multitud de cambios que puedan llevar al organismo a encontrar la solución, primero utilizando tareas que modifiquen las condiciones iniciales y progresivamente conducir al sujeto a formas más avanzadas del comportamiento. De los ejemplos citados anteriormente, la adición de peso a las extremidades era una forma de perturbar al sistema, de modificar las condiciones iniciales para desestabilizar el atractor, el patrón preferido. Este cambio puede llevar a un inicial descenso en el rendimiento, pero proporcionará nuevas experiencias que no se habrían dado con la simple imitación de un modelo impuesto. Se fuerza al sistema así a desarrollar nuevas soluciones para estabilizarse bajo el principio de la autoorganización. Si el niño no encuentra por sí mismo la solución, se buscarán estrategias para orientar el proceso, que incluso pueden incluir instrucciones verbales, pero de todas formas siempre se conseguirá la formación de nuevas

sinergias que mejorarán la coordinación motriz. No se propondrá ya el aprender patrones motores fijos ni se considerará el error de la forma tradicional, sino como una fluctuación del sistema necesaria para que se pueda producir la adaptación.

Siguiendo estas premisas, se pueden plantear sesiones de aprendizaje en las etapas de desarrollo en las que se enfatice la variación de ejercicios para estimular los mecanismos individuales de adaptación. Los juegos pueden ser una herramienta clave para este planteamiento, modificando constantemente las condiciones o reglas de éstos. En los ejercicios basados en la repetición se pueden buscar condiciones iniciales y finales distintas para enfrentar al alumno o alumna al máximo número de situaciones diferentes y que su organismo pueda reaccionar autoorganizándose de la mejor manera. Las variaciones podrán centrarse en las condiciones espaciales, temporales o en el tipo de sistemas que interactúan, modificando las posiciones iniciales o finales, los ángulos de los diferentes segmentos corporales durante la ejecución de las tareas, los ritmos de la tarea o de las diferentes subtareas, la velocidad de éstas o los objetos a manipular (Torrents y Balagué, 2001a), siempre teniendo en cuenta el objetivo que perseguimos, la dirección del aprendizaje que buscamos. Además, se generará una mayor motivación en el alumno, evitando la monotonía de la repetición propia de la práctica física tradicional. Tal y como ya se ha comentado, hay numerosos estudios que muestran la utilidad de la práctica variable para aprender tareas, aunque la explicación que se le da a esta mejora difiere considerablemente de la concepción dinámica del aprendizaje que aquí se explica.

Tanto Thelen como el resto de investigadores que siguen esta línea de investigación proponen estudios de casos en vez de los tradicionales estudios de comparación de grupos. Los principios dinámicos se pueden entender cuando se analizan los datos individuales, y en el caso del desarrollo motor, recogidos longitudinalmente a intervalos frecuentes. Gracias a este tipo de estudios, Thelen es capaz de defender que el desarrollo es lineal y cuantitativo, ya que siempre se incrementa, pero a su

vez es siempre no lineal y cualitativo, ya que la complejidad lleva a nuevas formas y habilidades. Newell y Molenaar (1998) también defienden la no linealidad del crecimiento, teniendo en cuenta que se producen fases en las que no hay crecimiento alternados con periodos cortos de crecimiento rápido. Estas conclusiones no pueden extraerse de los estudios tradicionales de grupos o longitudinales con demasiado espacio de tiempo entre tests, por lo que es una prueba más de la utilidad del nuevo enfoque. Los principios de la dependencia sensible a las condiciones iniciales; la equifinalidad, por el cual multitud de caminos del desarrollo pueden desembocar en el mismo resultado, y el consecuente ruido que esto comporta a los grupos experimentales; la preponderancia del proceso; y la posibilidad de que el comportamiento aleatorio esté condicionado por un atractor extraño irreconocible en un estudio de grupos, son otras razones que apoyan los estudios de casos para investigar los problemas del desarrollo motor.

5.4- Aplicaciones de la TSD al estudio de movimientos discretos

Los estudios que se han citado anteriormente se centraban eminentemente en tareas cíclicas. Desde la perspectiva de los sistemas dinámicos, hay pocos estudios que analicen un movimiento discreto. Probablemente esto sea consecuencia de la mayor dificultad que presentan para identificar los estados de atracción debido a la corta duración de la tarea y a las variables que caracterizan el estado del sistema. Sin embargo, para el ámbito deportivo estas tareas serán fundamentales, lo que justifica que les dediquemos un apartado especial.

Schöner estudió una tarea discreta en 1990 (Schöner, 1990) simulando movimientos de alcanzar objetos en un modelo matemático en el que el comportamiento estaba influenciado por la dinámica intrínseca y la información de la intención.

En todos los movimientos discretos la intención será un factor influyente, puesto que el movimiento debe iniciarse en un momento concreto. La intención se tratará como una información del comportamiento, y la dinámica intrínseca vendrá determinada por la postura inicial y por el objetivo del movimiento. En función del modelo, los movimientos entre una postura inicial y una final se definirán por un ciclo límite atractor o por un atractor puntual. Cuando ocurre una perturbación de los parámetros específicos, como la intención de moverse, la postura inicial se convierte en inestable y el ciclo límite determinará el comportamiento posterior. De acuerdo con este modelo, la coordinación de movimientos discretos como el de alcanzar objetos puede ser entendida como resultado del acoplamiento de diferentes componentes dinámicos, al igual que en los movimientos rítmicos. Existirá la tendencia a la sincronización de los movimientos discretos incluso en el caso de que cada componente individual tenga tiempos intrínsecos de movimiento distintos. Aparecerán respuestas compensatorias cuando se perturba un componente, probando la estabilidad del patrón. Esta sincronización se explica de forma paralela a la sincronización de los movimientos rítmicos en fase, pero análogamente al modo de coordinación rítmico antifase, Schöner considera la tendencia a secuenciar diferentes movimientos discretos que se presentan con una cierta diferencia de tiempo. Para trasladar los resultados de su estudio al mundo real, Schöner defendió la identificación empírica previa de la dinámica intrínseca. No obstante, en la realidad, no está claro como separar la dinámica intrínseca de la información del comportamiento, como es el caso de la intención (Button et al., 2001).

Walter et al. (1993) estudiaron una tarea bimanual discreta. En este tipo de tareas, el sistema tenderá a ir hacia el estado de coordinación preferido a medida que la acción progresa. La relación fase vendrá definida por el momento en que ambas manos inician el movimiento y cuando lo terminan. La tarea consistió en la flexión de un codo trasladando la palanca de un aparato de forma simultánea a la flexión y posterior extensión del otro brazo trasladando otra palanca. Se produjo una tendencia al acoplamiento, ambos brazos tendieron hacia una trayectoria espaciotemporal común. El brazo que

sólo se flexionaba se ralentizaba en el momento en el que el otro modificaba el sentido del desplazamiento, y éste realizaba una amplitud de movimiento menor que la pretendida (véase fig. 28).

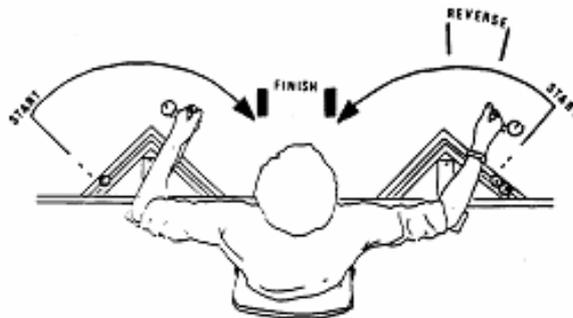


Fig. 28 Movimiento bimanual en el aparato del experimento (De Walter, Swinnen y Franz, 1993)

5.4.1 - El ciclo percepción-acción

De la conjunción de las ideas de la teoría de los sistemas dinámicos y de la psicología ecológica surgen nuevas formas de analizar los procesos de coordinación y control del movimiento, también en tareas deportivas. La perspectiva ecológica de la “percepción-acción” se basa en que el organismo humano no puede estudiarse independientemente del medio en el que se desarrolla (Gibson, 1975). La percepción y la acción están interconectadas y son interdependientes, produciendo el ciclo o acoplamiento percepción-acción. La exploración y selección de soluciones motrices específicas será un proceso de este tipo de acoplamiento en el que la información generada por la percepción y la acción se correlacionan.

El modelo de acción-percepción se formará por la unión del organismo con el medio en el que interactúa. La información del medio será conceptualizada como modelos requeridos de comportamiento. El organismo no se adapta a un estímulo, sino que se coordina con él y emerge el

comportamiento (Kelso y Schöner, 1988). Este proceso se relaciona con la autoorganización ya explicada, con el proceso de cooperación y competición que se establece entre la dinámica intrínseca del organismo y la dinámica de la tarea, intención o información del medio. El comportamiento autoorganizado emergerá de la confluencia de propiedades intrínsecas del ejecutor (como la fuerza, las reservas energéticas...) o factores extrínsecos (temperatura ambiental, objetos a manipular...). Cambios en cualquiera de estos subsistemas podrán conducir a cambios en el comportamiento del sistema, es decir, se producirá una reorganización (Ulrich et al., 1998).

Los análisis muestran la estabilidad de las acciones basadas en este acoplamiento de la percepción y la acción, de la misma forma que la variabilidad dentro de esta estabilidad es sinónimo de funcionalidad. Los sujetos experimentados pueden explotar la variabilidad del movimiento de forma que son más eficientes realizando la tarea, consiguiendo decrecer esta variabilidad durante el curso de la acción y mostrando un valor mínimo al final del movimiento.

Desde la perspectiva ecológica, cualquier acción de intercepción dependerá de la relación entre un parámetro del movimiento (la fuerza) y una propiedad relevante del flujo perceptual (información). El éxito de la intercepción se basará en la adaptación continua de los movimientos por parte del ejecutor, lo que no requiere el conocimiento de las características espaciotemporales del punto de intercepción con el objeto (McLeod y Dienes, 1993; Peper et al., 1994; McBeath, et al., 1995; Montagne et al., 2000). McLeod y Dienes (1993) destacan la capacidad inconsciente del cerebro para solucionar este tipo de tareas o para aprenderlas desde la infancia gracias a la experiencia y la observación de éstas. Lo importante será que la información sea significativa y que especifique directamente la acción. Montagne et al. (2000) estudiaron a 10 sujetos que debían mover un objeto de forma rectilínea llegando a un punto en el mismo momento que llegaba otro objeto móvil. Los participantes mostraron adaptaciones cinemáticas de sus movimientos cuando variaba el tiempo desde la orden de empezar el movimiento y el momento del contacto,

pero no se produjeron cambios cuando se modificaba la distancia que recorría el objeto móvil (o su velocidad).

Los movimientos cíclicos también se explican desde esta perspectiva, pero los hemos considerado en otro apartado debido a la importancia que han tenido para el desarrollo de la aplicación de la TSD en el movimiento humano. Las tareas en las que se coordinaba el movimiento cíclico con un estímulo visual son ejemplos de tareas rítmicas cíclicas de acoplamiento de la percepción visual y la acción (Byblow et al., 1995; Byblow et al., 1999). También la coordinación con patrones rítmicos, y muy especialmente la sincronización del movimiento corporal con el ritmo musical, ya sea con movimientos sencillos como con complejos como la danza, muestran la profunda interdependencia de la acción y la percepción. Esta sincronización presenta claramente estabilidad a la vez que la flexibilidad será sinónima de funcionalidad para adaptarse si el ritmo musical se modifica (Large, 2000).

5.4.2- Aplicaciones al estudio de tareas deportivas

La reducción de variabilidad característica de las tareas en las que se produce el acoplamiento de la percepción y la acción es estudiada por diferentes autores con relación a la carrera previa al salto de longitud (Buekers et al., 1999). Durante los últimos 4 pasos antes del salto se produce una reducción de la variabilidad de la distancia media de cada paso, mostrando la aparición de un mecanismo de control visual. La regulación inicial parece que depende del grado de ajustamiento que se precise, y, cuanto mayor sea este ajuste, antes se producirá la regulación.

Conclusiones similares se han obtenido de estudios de intercepción de pelotas. Ejemplos deportivos serán las acciones de cualquier jugador de un deporte colectivo como el baloncesto, en el que se necesita establecer una relación entre la información óptica y un parámetro específico de la acción.

Davids et al. (1999) utilizaron el saque de voleibol como tarea que requiere un alto grado de coordinación entre muchas partes relevantes del sistema de movimiento y necesita que la acción se coordine espacio-temporalmente con la información de los condicionantes impuestos por la pelota. Analizaron el desplazamiento y las series temporales de la coordinación entre los miembros durante el saque en jugadores expertos. Observaron una fuerte relación en fase entre los pares de articulaciones adyacentes (cadera-hombro, hombro-codo y codo-muñeca), mostrando estructuras organizadas sinérgicamente moviéndose en la misma dirección en el mismo momento de la transición y con perfiles de velocidad similares.

Temprado (2000) comparó este patrón con el que tienen aprendices noveles y es muy distinto, ya que mostraban relaciones en fase entre las tres articulaciones, aunque el patrón de los expertos también era estable en los noveles a bajas frecuencias (al igual que en el experimento de Kelso, hay dos estados atractores a bajas frecuencias y sólo uno a altas). Con relación a la posición de la pelota, los mejores sacadores mantenían una consistencia espacial y temporal en la colocación vertical de la pelota, y el análisis de la relación entre la información de la pelota en el punto más alto y el inicio del movimiento de la cadera hacia delante revelaron que estaban muy acoplados y eran muy poco variables. En las direcciones x y y , las variaciones de la posición de la pelota fueron significativamente mayores, lo que sugirió a los autores que la práctica del saque debía enfatizar el desarrollo de picos de altura de la pelota invariantes, y no la constancia en la posición derecha-izquierda. La acción del inicio del golpeo y la bola en el punto más alto constituirá un estado atractor, un “sistema de saque”, por lo que el uso tradicional de descomposición de la tarea en el aprendizaje puede perturbar la relación entre los parámetros de orden y de control. La práctica de las diferentes fases sin dividir las permitiría al aprendiz explorar las relaciones emergentes entre los condicionantes físicos e informacionales de la tarea y encontrar relaciones individuales. Si se practica de forma descompuesta, el aprendiz explorará la región incorrecta del espacio. Paralelamente, la investigación también tiene que tener en cuenta el medio

donde se ejecutan las tareas, y no trasladar directamente los resultados del laboratorio al campo, ya que las relaciones que se establecen serán totalmente diferentes (Davids et al., 2000).

Este estudio nos sugiere métodos de entrenamiento que no descompongan las tareas, por lo que habrá que buscar variaciones del medio que produzcan variaciones globales en el sujeto. Siguiendo esta línea, otros autores proponen variaciones como el uso de marcas en el suelo para facilitar el rendimiento sin perturbar el acoplamiento percepción-acción. Las marcas resaltarán puntos importantes de la tarea. Los inexpertos serán incapaces de detectar la información relevante y útil del medio, y tendrán problemas para producir el patrón de movimiento. Con las marcas, los aprendices serán más susceptibles a la información que les proporciona el medio (Buekers et al., 1999). Esta proposición es trasladable al entrenamiento de cualquier otro gesto deportivo, y las marcas no tienen porqué ser visuales. Se podrían utilizar señales auditivas para marcar un ritmo deseado o para enfatizarlo, aprovechando la tendencia que tiene nuestro organismo a que se produzca un acoplamiento.

En otra línea de investigación, también relacionada con la ejecución de movimientos discretos deportivos, Stergiou et al. (2001) analizaron las estrategias de coordinación del sistema locomotor humano para superar un obstáculo mientras se ejecutaba una acción cíclica: correr. Se consideró la relación de fases entre las diferentes partes del tren inferior (el pie con la pierna y la pierna con la cadera) como parámetro de orden, y la altura del obstáculo como parámetro de control, suponiendo que a partir de una altura crítica se produciría un cambio de patrón. Es decir, se produciría una bifurcación entre dos atractores. La relación de fases entre estos tres segmentos ya se había utilizado en otros estudios que analizaban la coordinación al correr y se había demostrado la variabilidad existente de ésta como signo de adaptabilidad y mantenimiento de la estabilidad externa (Heiderscheit et al., 1999). Diez sujetos realizaron la prueba con obstáculos de alturas correspondientes al 10, 12'5, 15, 17'5, 20 y 22'5 % de su altura.

Los resultados gráficos y estadísticos mostraron como efectivamente se produjo un cambio y se detectó como altura crítica la correspondiente al 15% de la altura del sujeto, ya que es donde se producían diferencias significativas, tanto en el momento del despegue como del aterrizaje. Se perdía la relación en fase entre el pie y la pierna en el momento del aterrizaje, por lo que parece que con obstáculos menores se contactaba con el suelo con una dorsiflexión del pie (apoyando primero el talón), mientras que con obstáculos mayores se contactaba con una flexión plantar. No obstante, no se observó el aumento de variabilidad característico previo al cambio de atractor, sino que la variabilidad fue aumentando con la altura, incluso después de que se produjera el cambio. En cuanto a la relación entre la pierna y la cadera, también se produjo el cambio, aunque de forma inversa y en el momento de la impulsión, ya que a medida que aumentaba la altura del obstáculo aumentaba la relación en fase entre la pierna y la cadera. Posteriormente, al volver a contactar con el suelo, la relación era más inestable cuanto más alto era el obstáculo, seguramente por las altas fuerzas de impacto a este nivel.

Otro estudio que se realizó en el ámbito deportivo y que pretendía observar la autoorganización dinámica de una acción motriz fue el realizado por Liu y Burton (1999). Se analizó el tiro a canasta de baloncesto utilizando como variable dependiente la forma de lanzar y como parámetro de control o variable independiente la distancia de tiro. Se grabó el lanzamiento a canasta de 10 sujetos desde diferentes distancias repitiendo la acción 20 veces en cada una de ellas. Se consideró que aumentando la distancia de tiro la tarea aumentaba de dificultad, debido a que la precisión del tiro disminuyó progresivamente. Para valorar la forma del lanzamiento se utilizó la observación de diferentes partes del cuerpo y su posición en el momento de lanzar el balón, concluyendo que todos los sujetos mostraban una alta estabilidad durante los 20 tiros ejecutados en cada distancia. En cambio, a partir de una determinada distancia se producía un cambio en la posición que adoptaba el sujeto para lanzar en el 92'5 % de los casos. En la distancia previa a la transición, se observó también un ligero aumento de la

inestabilidad o variabilidad. Los autores defienden así que el tiro de baloncesto puede ser estudiado como un sistema dinámico, ya que, al aumentar la dificultad de la tarea, la forma de lanzar se modifica a partir de un valor crítico.

Es éste un estudio sencillo, pero que muestra un hecho similar al observado en el estudio de Stergiou et al. (2001) y lo que vemos a menudo en la práctica cuando aumentamos la dificultad de la tarea a realizar mediante algún factor externo a la tarea en sí. El factor externo podrá ser la distancia de un lanzamiento, la altura o la longitud de un obstáculo a saltar, la velocidad de un balón que debemos recibir o golpear o la frecuencia del movimiento. Esto nos sugiere multitud de formas para modificar la técnica del deportista sin necesidad de mostrarle un modelo externo de ejecución, sino explorando cual será aquella variable que le producirá el cambio en la dirección que a dicho atleta le pueda beneficiar. La modificación de dicha variable podrá proponerse de forma que aumente la dificultad o que la facilite, en función de nuestros objetivos. Por ejemplo, si consideramos que la técnica de carrera de un deportista no es la adecuada porque no eleva las rodillas suficientemente, en lugar de mostrarle la imagen de un corredor que sí que lo hace o decirle textualmente que corrija ese aspecto de su técnica, podemos dificultarle la tarea proponiéndole que corra saltando obstáculos de cierta altura. Si observamos que un jugador de un deporte de equipo no lanza el balón con suficiente fuerza a sus compañeros, podemos, durante el entrenamiento, proponerle metas más alejadas. O a la inversa, si en un deporte estético, el deportista comete errores de ejecución técnica en una acción motriz que no es capaz de corregir, podemos proponerle que reduzca la velocidad de ejecución de dicha acción.

Los entrenadores suelen utilizar variaciones de este tipo, y cabe destacar que en ninguna de estas acciones se pide al sujeto que copie un modelo externo.

5.5- Aplicaciones de la TSD al estudio de la autoorganización entre personas en tareas de cooperación-oposición

De forma paralela a los estudios sobre coordinación entre miembros de una misma persona, aparecen muchas investigaciones en las que se analiza la coordinación entre miembros de personas distintas. Consideramos este tipo de tareas de gran importancia a la hora de explicar las aplicaciones de la TSD, puesto que representan un ejemplo de tareas en las que no hay una estructura cognitiva común que pueda producir la coordinación motriz. El hecho de que aparezcan fenómenos similares a los vistos en los apartados anteriores, como las transiciones entre fases o las fluctuaciones críticas, muestra que estos fenómenos no son fruto de la existencia de un programa motor. Al igual que en los sistemas físicos, no puede haber un programa común entre dos personas. Un ejemplo de acoplamiento entre dos sistemas físicos es el de dos relojes de pared colocados próximos uno del otro y con sus péndulos oscilando en fases distintas. La vibración de la pared provocará una interacción entre ambos relojes hasta que oscilen en modo en fase o antifase, llegando así a un estado de equilibrio o atractor. Estudios con personas muestran un comportamiento similar cuando se pide a los sujetos que hagan oscilar un miembro o un péndulo a la vez que otra persona mientras puedan verse mutuamente.

Schmidt, Carello y Turvey (1990), y posteriormente Schmidt, Bienvenu, Fitzpatrick y Amazeen (1998) demostraron una transición de un estado de coordinación antifase a uno en fase en una tarea en la que los sujetos debían mover su pierna u oscilar un péndulo con la muñeca coordinadamente y en modo antifase con la del compañero y a una frecuencia determinada por un metrónomo. El aumento de la frecuencia de forma progresiva provocó el mismo efecto que el famoso estudio de Kelso, la imposibilidad de mantener la coordinación antifase y la transición a una coordinación en fase (véase fig. 29), pero no viceversa, así como la

aparición de fluctuaciones críticas o el fenómeno de la histéresis. La interacción de las fases en el movimiento de diferentes sistemas biológicos sigue los mismos principios dinámicos independientemente de los mecanismos de acoplamiento. En el caso del estudio de Kelso, el acoplamiento se basó en mecanismos mecanoreceptivos, mientras que en los que se muestran en este apartado, se basará en mecanismos fotoreceptivos.

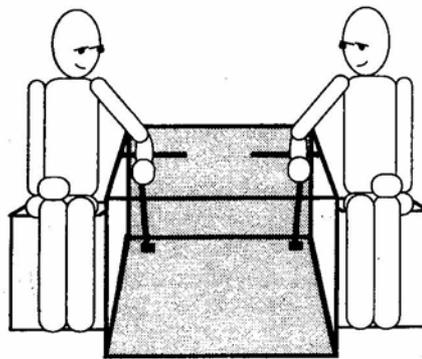


Fig. 29 Vista frontal de uno de los aparatos que se utilizó para estudiar la coordinación entre personas oscilando un péndulo

Schmidt y Turvey (1994) modificaron las propiedades iniciales (longitud) de los péndulos que los sujetos debían oscilar, manipulando como consecuencia la frecuencia más confortable de oscilación para los sujetos. Se creaba de esta forma una competición de frecuencias, contabilizando la diferencia entre ellas y se propuso un acoplamiento en modo antifase. Se estudió a tres sujetos que formaron tres parejas distintas y los resultados mostraron como a mayor diferencia entre las frecuencias, mayor era la desviación de la relación fase y más fluctuaciones aparecían.

Treffner (1999) también estudió si el acoplamiento entre dos individuos tenía consecuencias similares al de dos miembros del mismo sujeto en actividades de coordinación de multifrecuencia. Efectivamente, se produjeron transiciones entre radios de multifrecuencia en acoplamientos

entre dos personas (acoplados acústicamente, hápticamente o visualmente), ya que al aumentar la frecuencia del movimiento decrecía el radio de frecuencia de coordinación.

Ya se ha comentado anteriormente (véase apartado 5.3.2) que la investigación en este campo ha planteado la duda sobre el mecanismo que gobierna este fenómeno coordinativo, pudiendo ser los condicionantes neuromusculares, los perceptivos, o una combinación de ambos. Oullier et al. (2003) proponen un estudio en el que un individuo debía mover su dedo con la mano en pronación siguiendo el ritmo de un metrónomo. Otro sujeto, que veía al primero pero no oía el metrónomo debía coordinarse con el otro sujeto realizando el mismo movimiento en diferentes situaciones: con la mano en pronación, en supinación, manteniendo una relación en fase y manteniendo una relación antifase. En la mitad del intento, desaparecía el sonido del metrónomo para favorecer la interacción de ambos sujetos. Los resultados muestran como se produce un mayor acoplamiento cuando el sonido del metrónomo desaparece, resaltando la importancia de la interacción mutua. También se observa que la interacción más estable, en la que no se producen transiciones, es cuando ambos sujetos están con la mano en pronación y se mueven con una relación en fase. En esta misma posición y empezando con una relación antifase, se produce una bifurcación al modo en fase. Cuando el sujeto que “sigue” coloca su mano en supinación se producen transiciones a movimientos inestables. Así, tanto la posición de la mano como la percepción visual del movimiento influirán en este fenómeno. Sin embargo, volvemos a observar aquí que no se consideran las sensaciones propioceptivas, por lo que no se demuestra claramente que la percepción no sea la gobernante de la acción.

Estos estudios muestran los fenómenos de transición o de coordinación de fases en tareas de coordinación interpersonal en los que el objetivo de la interacción es la coordinación por sí misma. Pero también se puede investigar la coordinación interpersonal en tareas donde esta coordinación no es el principal objetivo, como sucede en la mayoría de actividades

deportivas, tal y como hicieron Schmidt, O'Brien y Sysko (1999). Propusieron una tarea a 30 sujetos que participaron en parejas mientras permanecían sentados uno frente al otro en una mesa. Debían colocar cartas en pilas diferentes para cada sujeto y previamente especificadas en función del palo de la carta sobre la superficie de la mesa. Realizaron la tarea solos y en parejas, y divididos en tres grupos de 10 que lo hacían bajo tres condiciones distintas: con el efecto de la intención, ya que se les explicó que el objetivo del estudio era el efecto de la facilitación social sobre la ejecución cognitiva; un grupo control, que no conocía la intención del estudio; y un grupo condicionados espacialmente, ya que debían colocar las cartas en cuatro pilas compartidas. Únicamente el primer grupo obtuvo diferencias significativas entre la correlación del movimiento de los dos sujetos cuando lo ejecutaban solos o en parejas. Sincronizaron sus movimientos, lo que revelaría una interacción social, pero ésta solo ocurre cuando las dos personas se mueven a la vez y además hay un contexto intencional. No obstante, dos de los autores que realizaron este estudio, Schmidt y O'Brien(1997), habían estudiado otra tarea previamente en la que dos sujetos debían oscilar péndulos con la mano a una frecuencia confortable utilizando péndulos iguales o distintos. Cuando los dos sujetos no se veían cada uno encontraba su frecuencia más confortable, pero cuando se veían se producía una interacción de las frecuencias, mostrando un ejemplo de una tarea en la que el objetivo no es la coordinación y se produce una interacción no intencional. Se requiere por lo tanto más investigación en este sentido para valorar la influencia de la intención en la interacción entre personas en tareas de coordinación.

5.5.1 - Aplicaciones al estudio de tareas deportivas

El estudio de la interacción entre personas tiene claras aplicaciones en la investigación deportiva. Si la tarea de las cartas pretendía aproximarse a las

actividades deportivas podemos encontrar otros ejemplos mucho más evidentes aunque no se hayan estudiado desde esta perspectiva. Todos los deportes en los que se realizan movimientos con música y en grupo pueden ser objeto de este tipo de estudios, como es el caso de la gimnasia aeróbica, la natación sincronizada o la gimnasia rítmica. Estos deportes estarán constituidos por tareas en las que el objetivo es la coordinación interpersonal en sí misma, además de acoplarse a una frecuencia externa marcada por el ritmo de la música. No obstante, la mayoría de deportes de equipo estarán constituidos por tareas en las que la coordinación entre ellos no será el objetivo, como sucedía en la tarea de las cartas o de la oscilación del péndulo a la frecuencia más confortable. El estudio de la interacción entre ellos puede explicar comportamientos que se dan en el juego, así como también se puede estudiar la interacción entre sujetos de equipos diferentes que juegan uno contra el otro, es decir, en tareas de oposición entre ellos.

En esta línea, McGarry y sus colaboradores estudiaron diversos deportes de cooperación-oposición, como el squash o el fútbol, para demostrar que éstos pueden analizarse concibiéndolos como sistemas dinámicos complejos, ya que presentan el comportamiento dinámico característico de éstos (McGarry et al., 2002). Inicialmente, McGarry y Franks (1996) utilizaron esta perspectiva para explicar las relaciones entre los jugadores de squash en competición teniendo en cuenta la organización natural y la estabilidad de los sistemas no lineales. En sus estudios, la relación con las teorías de la complejidad se basa en la explicación teórica de los resultados, pero no en los métodos utilizados, ya que no se utilizan las herramientas que ofrece la TSD. El objetivo del estudio fue predecir las respuestas de los jugadores en función de la condición precedente, teniendo en cuenta el golpeo previo o éste con su antecedente. Para obtener los datos de los partidos se utilizó el registro de vídeo considerando 15 tipos de golpeo, 16 posiciones en la pista y tres resultados posibles de la jugada. Combinando estos parámetros se obtuvieron las condiciones del golpeo precedente, así como la respuesta a cada una de ellas. Se analizaron 8 jugadores internacionales, que mostraron una alta consistencia en sus patrones de juego, aunque las respuestas de

una o dos condiciones de golpeo cambiaron entre juegos ($p < 0,25$). Los autores sugirieron que este hecho era debido a que cada jugador intentaba maximizar su rendimiento a través del cambio de patrón de juego en competición. Esto también sugirió que la interacción entre jugadores es única a la situación y que depende del oponente. No obstante, los autores mostraron la consistencia en la relación poco variante entre una determinada situación y un tipo de respuesta de los jugadores.

Las propiedades teóricas de acoplamiento entre dos sistemas no lineales se estudiaron también en competiciones de squash por los mismos autores con la intención de mostrar transiciones e intermitencia entre estados de comportamiento distintos (McGarry et al., 1999). Consideraron esta actividad más competitiva que cooperativa, aunque también presentaba cooperación puesto que ambos jugadores buscaban un ritmo de juego en el que se pudiera conseguir un estado fisiológico relativamente confortable. Además, el sistema estaba condicionado por las reglas del juego, por las capacidades técnicas y físicas de los jugadores, y por la interacción, que podía ser periódica o estocástica. Se analizaron 60 jugadas de los jugadores del estudio anterior y se identificaron los golpes que marcaban las transiciones de comportamiento entre estados estables e inestables utilizando observadores que conocían el concepto de estado estable e inestable de antemano. Con este experimento, los autores concluyeron que el sistema se movía entre diferentes estados de comportamiento después de una perturbación. Para interpretar estos resultados, los autores realizaron otro estudio. Utilizaron el análisis de vídeo de cuatro jugadas mediante observadores. Se analizó teniendo en cuenta las relaciones en fase o en antifase de los jugadores, y llegaron a la conclusión de que la coordinación en modo antifase era estable y sujeta a fluctuaciones que probaban constantemente el sistema. Consideraron por tanto al sistema monoestable con un único atractor. Las perturbaciones que provocaban los golpes precedían un cambio, debido al paso por una inestabilidad.

Palut y Zanone (2003) también consideraron la relación de fases entre dos jugadores de un deporte de raqueta, aunque en este caso de tenis. Consideraron que en este deporte los jugadores exhiben un movimiento periódico y pueden considerarse como sistemas no lineales oscilatorios acoplados. Se registró a 4 jugadores de nivel nacional y se analizó el movimiento lateral que exhibían durante el juego y su relación entre ellos. Los resultados mostraron como, de todas las relaciones de fase que se observaron, la de 0° y la de 180° eran las más estables y frecuentes, y afirmaron que este fenómeno corrobora que la relación de fases puede ser una variable colectiva que caracterice la relación entre los desplazamientos de los jugadores de tenis.

6- Aplicaciones de la TSD a la fisiología humana

La aplicación de los principios de la teoría de los sistemas dinámicos a la fisiología humana abre un inmenso abanico de posibilidades, la mayoría aún sin explorar. La dinámica no lineal ofrece nuevas herramientas con las que cuantificar, modelar e incluso predecir la conducta de los sistemas complejos, y por tanto de los distintos sistemas corporales.

Muchos procesos fisiológicos se desarrollan de forma simultánea en diferentes lugares del organismo y a muy distinta escala, pero interactúan entre ellos directa o indirectamente, lo que introduce muchas dificultades en su estudio. Por ello se insiste en el uso de las series temporales y en la incorporación de herramientas no lineales para su análisis (Kantz y Kurths, 1998). Se ha demostrado experimentalmente que aparecen señales de comportamiento no lineal en la respuesta de diferentes sistemas, como el cardiorrespiratorio (Hoyer et al., 1998; Potatov et al., 1998; Schiek et al., 1998; Skinner et al., 1998), el muscular (Friedrich et al., 1998) o en su interacción con otros sistemas.

Uno de los fenómenos estudiados en este campo aplicado es precisamente el de la variabilidad en el comportamiento de los sistemas biológicos, siendo ésta un signo de buen funcionamiento y no lo contrario. Es fácil distinguir ya un paralelismo con el estudio de la coordinación de movimientos y las fluctuaciones que se producen en el aprendizaje, e incluso se ha estudiado el fenómeno de la variabilidad en los patrones de locomoción en sujetos sanos y en sujetos con diferentes tipos de lesiones, siendo menor en estos últimos (Hamill et al., 1999; Selles et al., 2001). Es una característica conocida de las series de datos fisiológicos su no estacionariedad, es decir, que sus propiedades estadísticas no se mantienen constantes en el tiempo como consecuencia de la necesidad que tiene el organismo de adaptarse y

dar respuesta a los diferentes estímulos internos y externos (Bernaola-Galván, 2002). En los pacientes con anomalías cardíacas se observa una reducción del control autonómico de la frecuencia cardíaca manifestada por una reducción de la variabilidad total (Goldberger et al., 1990, Skinner et al., 1998). La variabilidad en la frecuencia cardíaca o HRV (Heart Rate Variability) refleja la oscilación continua de los intervalos entre los latidos del corazón alrededor del valor medio. La reducción en la HRV se detecta especialmente con el uso de herramientas no lineales, ya que los tradicionales predictores como la media o la desviación estándar no serán de suficiente precisión (Voss et al., 1997). Por este motivo, Bernaola-Galván et al. (2001) han utilizado herramientas de la dinámica no lineal para analizar la heterogeneidad de las series temporales de los latidos del corazón o frecuencia cardíaca. Se escogió a un grupo de sujetos sanos (entre ellos astronautas en ausencia de gravedad) y otro de pacientes enfermos de fallo cardíaco congestivo para comparar las series temporales de los latidos del corazón durante 6 horas. Los sujetos sanos mostraron mayor variabilidad que los enfermos, pero dentro de esta variabilidad se pudo descifrar cierto orden en la distribución de los tamaños de segmentos estacionarios, también presente en los sujetos enfermos. Según los autores, esta “universalidad” se puede interpretar como la consecuencia de que tanto individuos sanos como enfermos intentan responder de la misma forma a los estímulos modificando el ritmo cardíaco, pero en los enfermos esta respuesta está mucho más atenuada.

Como ejemplo de respuesta global de características similares a las descritas, presentamos el estudio llevado a cabo por Parra et al. (2001). Se analizaron los cambios diarios en el peso de un grupo de pacientes de un centro hospitalario diagnosticados con anorexia nerviosa, otro grupo con otros trastornos en su dieta y un grupo control. Para el análisis se estudiaron las series temporales mediante diversas herramientas estadísticas proporcionadas por la teoría del caos. Se observó que los pacientes sin anomalías dietéticas tenían mayores variaciones en el peso, provocadas por

múltiples factores que las hace parecer aleatorias, que los pacientes enfermos.

También en muchos de los estudios relacionados con la coordinación de movimientos cíclicos con estímulos externos se han observado los fenómenos característicos descritos por la teoría de los sistemas dinámicos analizando la variable fisiológica de la señal electromiográfica de los músculos implicados (Friedrich et al., 1998).

Directamente relacionado con los estudios sobre coordinación tratados anteriormente, se han realizado investigaciones sobre la aparición de patrones coordinativos estables entre subsistemas fisiológicos. De la misma forma que esto sucede entre miembros, también se produce entre el sistema respiratorio y el sistema locomotor. Incluso se han observado tendencias de sincronización entre el sistema cardiovascular y el sistema locomotor. En un estudio sobre lanzamientos de dardos, se observó como los sujetos mostraban cierta tendencia a sincronizar el ritmo de los lanzamientos con el ritmo de la frecuencia cardíaca (Riera y Gordillo, 1982).

El acoplamiento entre el sistema locomotor y el respiratorio se ha estudiado en animales y en humanos durante la locomoción, ya sea corriendo o en bicicleta, mostrando una coordinación relativa entre ellos, más fuerte a medida que los sujetos tenían una mayor experiencia ejecutando la tarea (Bernasconi y Kohl, 1993; Bramble y Carrier, 1983; Garlando et al., 1985). Se hipotetizó sobre la posibilidad de que los impulsos verticales generados por las fuerzas de reacción en los apoyos produjeran el acoplamiento entre la respiración y el movimiento, pero el hecho de que también se produzca con movimientos del tren superior rebatía esta hipótesis.

Así lo demostraron Amazeen et al. (2001) analizando el acoplamiento entre el impulso de los brazos al realizar el movimiento de desplazamiento en una silla de ruedas ergométrica y la respiración con un sistema de medida del flujo de aire. Siete sujetos realizaron la tarea mostrando el acoplamiento,

aunque éste fue diferente en función de la experiencia de cada uno. La relación que predominó fue la de 2:1 entre los dos sistemas.

Catorce sujetos más realizaron la misma tarea a diferentes velocidades, lo que provocaba un cambio en el radio de frecuencias de los dos sistemas. Al incrementar la frecuencia de movimiento, se produjo un cambio de 2:1 a 3:1. En las tareas de acoplamiento entre miembros del cuerpo los cambios suelen producirse en la dirección contraria, pero, seguramente por las diferencias entre el "timing" de estos sistemas, uno puede cambiar de frecuencia más rápidamente que el otro.

Por último, los sujetos repitieron la tarea modificando la respiración al utilizar un entrenador del músculo inspiratorio que aumenta la resistencia en la inspiración intentado provocar así un cambio en la frecuencia de respiración. Este objetivo no se consiguió y los radios se mantuvieron. Los autores creen posible que este sistema de modificar la respiración no manipule directamente al sistema y no se atreven a afirmar que el cambio de frecuencia sea realmente unidireccional.

Otro campo en el que las herramientas de los sistemas dinámicos podrían ser de gran utilidad es en el de la evaluación fisiológica de deportistas, teniendo en cuenta la evolución de las variables, es decir, las series temporales, y no los estados fijos o estables. Las variables a evaluar van desde la frecuencia cardíaca o el peso hasta el consumo de oxígeno, la acumulación de ácido láctico o la secreción de hormonas. En el caso de la frecuencia cardíaca se ha observado, por ejemplo, que con un entrenamiento suficientemente largo o intenso de resistencia se incrementa la HRV (Dixon et al., 1992; Seals y Chase, 1989; Shi et al., 1995; Yamamoto et al., 2001). En cambio, en estado de sobreentrenamiento se observa un descenso en la HRV (Mourot et al., 2004).

La aplicación de cargas no lineales así como la naturaleza no lineal del organismo humano sugiere de forma clara la no-linealidad de los efectos, por

lo que las predicciones que suelen hacerse en cuanto a la relación de diferentes variables ante este tipo de cargas no suelen ser muy precisas. Así, por ejemplo, se proponen métodos para predecir la concentración de lactato en función de la frecuencia cardiaca o del $\dot{V}O_2\text{max}$ haciendo referencia normalmente al ejercicio continuo. Generalmente los entrenamientos o las situaciones de competición no son continuos, por lo que las herramientas de los sistemas dinámicos podrían ayudar a mejorar los modelos existentes de predicción o de relación entre diferentes variables.

Otras variables que podemos evaluar de forma continua son los registros electromiográficos o las series temporales de la fuerza aplicada sobre una plataforma de fuerzas, tal y como se explicará en la parte empírica mediante el análisis de saltos verticales. Además de la aplicación que explicaremos posteriormente, también podríamos utilizar las herramientas de la TSD para evaluar, por ejemplo, la fatiga y el temblor muscular. La oscilación temblorosa de alguna parte del cuerpo o temblor muscular puede ser producto de alguna disfunción, como el Parkinson, o puede corresponder al temblor fisiológico. Éste es un fenómeno normal que se da en todas las personas y se presenta como un ligero temblor que puede observarse, por ejemplo, al sostener un objeto pequeño. En ciertas situaciones, el temblor aumenta, y se denominará “temblor fisiológico aumentado o exagerado”. Éste se puede producir por el estrés o la fatiga, al mantener o realizar contracciones musculares (Ebenbichler et al., 2000; McAuley et al., 1997; Vitasalo y Gajevski, 1994).

El origen del temblor muscular no está claro, aunque se alude a oscilaciones en el arco del reflejo de estiramiento (Hagbarth y Young, 1979; Young, 1984); a la actividad de las células de Renshaw (Elbe y Randall, 1976) y/o sincronización de unidades motoras (Hagbarth et al., 1983); al reclutamiento de nuevas unidades motoras (Allum et al., 1978); o a una combinación de factores relacionados con el sistema nervioso central y biomecánicos en función de la frecuencia del temblor (Amjad et al., 1994; McAuley et al., 1997; Vaillancourt et al., 2000). La fatiga es un factor determinante en la

producción de temblor muscular y generalmente lo aumentará. Se describen diversos tipos de fatiga, entre las que se encuentra la fatiga muscular localizada. La fatiga muscular se define como la reducción de la capacidad del músculo para producir la máxima fuerza posible debido al ejercicio (Gandevia, 2001). Enoka y Stuart (1992) la definen como el esfuerzo progresivo que se requiere para mantener una determinada fuerza en contracciones repetidas o mantenidas. Habrá un punto en el que la contracción no podrá mantenerse por más tiempo, que puede denominarse punto de fallo, aunque se critica que el considerar que la fatiga empieza en este punto implica que no puede detectarse hasta el momento en el que aparece (Romero, 2003).

Las frecuencias observadas en el análisis del temblor muscular durante contracciones musculares se modifican por el efecto de la fatiga (Ebenbichler et al., 2000; Furness et al., 1977; Gajewsky y Viitasalo, 1994; Garland et al., 1994; Löscher et al., 1994; Viitasalo y Gajewsky, 1994). Se ha encontrado incluso actividad muscular en la franja de frecuencias de 20 a 100 Hz en músculos capaces de producir grandes cantidades de fuerza (Keidel y Keidel, 1989). En los estudios sobre oscilaciones de una parte del cuerpo se han observado también temblores de frecuencias elevadas, especialmente al aumentar la fuerza que esta parte tenía que producir por la elevación de la carga a movilizar. Vaillancourt y Newell (2000) observaron como los temblores que se producían a una frecuencia de 40 Hz aumentaban con el incremento de la carga.

Generalmente, el temblor muscular se ha analizado mediante registros EMG o con el uso de acelerómetros, pero en estudios relacionados con la postura también se ha utilizado la plataforma de fuerzas para evaluarlo. Yarrow et al. (2001) observaron una alta correlación entre los registros EMG y el análisis extraído de la plataforma de fuerzas en estudios de posturografía y para la evaluación del temblor ortostático.

Desde la perspectiva de la TSD, el punto de fallo podría considerarse como una bifurcación del sistema. Por eso consideramos interesante analizarlo y observar si en esta bifurcación se producían fluctuaciones críticas. Para ello, utilizamos una acción motriz que posteriormente se utilizará en la parte empírica, las flexiones de brazos de tres apoyos. Analizamos las series temporales de la fuerza sobre una plataforma durante la ejecución de flexiones de tres apoyos por parte de gimnastas de élite internacional de gimnasia aeróbica. Observamos que cuando se producía el punto de fallo y la gimnasta caía al suelo (siempre y cuando fuera producto de la fatiga del tren superior), en las series temporales de la fuerza se apreciaban fluctuaciones de alta frecuencia en la zona de transición que no se observaban durante el desarrollo del resto de flexiones (Balagué y Torrents, 2003; Zakyntinaki et al., 2002).

7- Aplicaciones de la TSD al estudio de la postura humana

La interacción del ser humano con el medio en el que se desarrolla determinará su comportamiento postural. Por lo tanto, el estudio de la postura humana deberá tener en cuenta la perspectiva ecológica y el ciclo percepción-acción descritos anteriormente. Para poder mantener el correcto funcionamiento del organismo se precisa una estabilidad topológica de la configuración del cuerpo. A su vez, el organismo debe adaptarse a los cambios producidos por el propio cuerpo en movimiento, por el medio o por los objetivos de la tarea a desarrollar (Riccio, 1993). Se ha demostrado que el movimiento del centro de presión del cuerpo durante el mantenimiento de la postura responde al comportamiento de un sistema no lineal (Boker et al., 1998; Myklebust et al., 1995) y el análisis de la conjunción de estabilidad y adaptabilidad es descrito mediante la terminología de la teoría de los sistemas dinámicos por diversos autores (Bardy et al., 2002; Dijkstra et al., 1994; Marin et al., 1999; Oullier et al., 2002; Riccio, 1993; Stirling y Zakythinaki, 2004). Se considera así el espacio estado en el que se desenvuelve el sujeto, las orientaciones y configuraciones en las que la percepción y la acción son óptimas (atractores) y los límites de éstas (separatrices), que provocan al franquearse un cambio cualitativo en el comportamiento postural. Un sujeto podrá estar en un estado de equilibrio estable o inestable. Estará estable cuando después de una perturbación vuelve al estado inicial, por lo que ese estado dependerá de la capacidad del sujeto para desarrollar la fuerza necesaria para oponerse a la fuerza perturbadora (Boussiet y Bozec, 1998).

Tal y como describen Riccio y Stoffregen (1988), la coincidencia de la orientación del cuerpo con la de la dirección del equilibrio o de la gravedad minimiza el esfuerzo necesario para mantener la postura. Cuando se produce una desviación se requerirá un esfuerzo adicional para superar el

torque o momento de fuerza consecuente con esta “desalineación”, que será mayor cuanto mayor sea el vector de fuerza producido (véase fig. 30).

Momento de fuerza

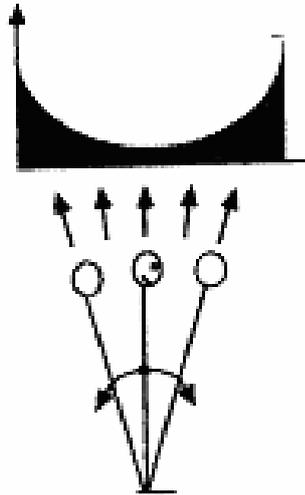


Fig. 30 Dinámica del equilibrio. A más desviación de la dirección de la gravedad, mayor esfuerzo se requiere para mantener la postura (Riccio, 1993)

No obstante, cualquier animal tiene que ser capaz de poder adquirir otras posturas u orientaciones para la realización de la mayoría de tareas, y la función más simple y básica del control postural será el evitar la caída durante la ejecución de éstas. El equilibrio se controlará mediante la aplicación de fuerza sobre la superficie de soporte para mantener el centro de masas del cuerpo sobre la región de contacto con la superficie. Un organismo multisegmentario posee múltiples formas de controlar el equilibrio involucrando las diferentes articulaciones del cuerpo, coordinándose de forma adecuada. Para estudiar este mecanismo, diferentes estudios analizan el comportamiento de individuos que se mantienen sobre una superficie que sufre repentinos movimientos. Nashner y McCollum (1985) lo hicieron y observaron los movimientos compensatorios coordinados de la cadera y de los tobillos. Si la rotación de los diferentes segmentos se realiza a partir de la cadera, el torso y las piernas se moverán en dirección opuesta, mientras que si la rotación es alrededor del tobillo, el torso y las piernas se moverán en la

misma dirección. El espacio n-dimensional en el que se puede representar las distintas posiciones adoptadas por el organismo será el espacio estado. En el plano, estará definido por dos ejes, tal y como se muestra en la figura 31. Existirá una pequeña región en el espacio en la cual una desviación del equilibrio erecto no provocará ningún movimiento de compensación, denominada región de tolerancia, y constituirá un atractor. Los desplazamientos en este atractor fruto de movimientos controlados se denominarán trayectorias, mientras que los desplazamientos resultantes de movimientos incontrolados del organismo se denominarán perturbaciones. La región del espacio en la que cualquier perturbación de la posición es reversible mediante el movimiento o tensión ejercida por las articulaciones del tobillo o de la cadera será la región de reversibilidad.

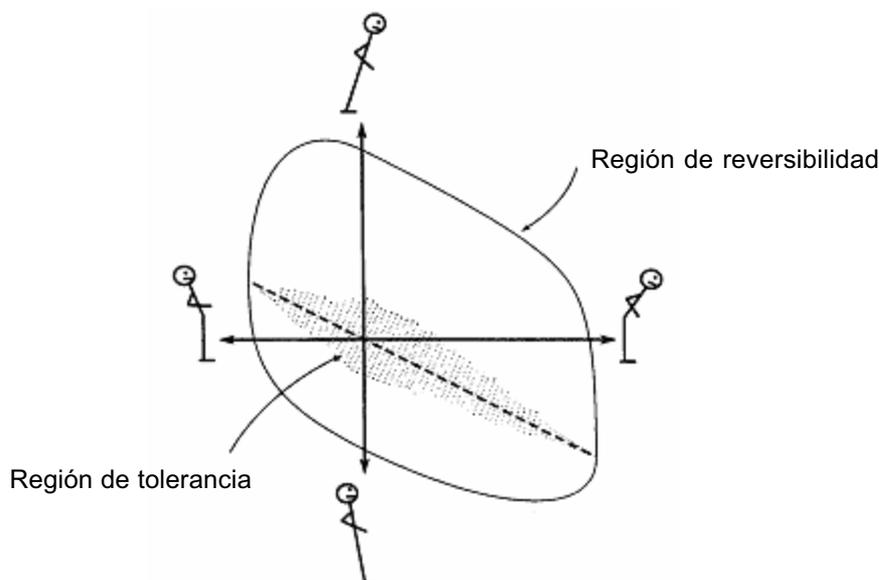


Fig. 31 Espacio estado en el plano para el balanceo anteroposterior. Los movimientos del tobillo están representados en el eje vertical, y los movimientos de la cadera en el eje horizontal. La región de tolerancia es el atractor para el equilibrio erecto (Riccio y Stoffregen, 1988)

Desde la perspectiva ecológica, se considera la estabilidad en posición bípeda directamente relacionada con la proximidad del centro de presión con los límites de la estabilidad o separatrices. Éstos separarán la región de reversibilidad y el espacio en el que es necesario la ejecución de un paso o

en el que se produce una caída. En estos casos diremos que se ha producido un cambio cualitativo en el comportamiento del sujeto. Cuanto más pequeña sea la base de soporte, más cerca estará siempre el centro de presión de los límites de la estabilidad. El control de esta estabilidad dependerá de las propiedades del organismo, en el que se incluye los objetos que transporta, por lo que en el deporte se deberá tener en cuenta las características del material que se utiliza, como balones, raquetas...; de la superficie de soporte, su inclinación, firmeza, propiedades de fricción...; y de los objetivos del comportamiento o tareas (McGinnis y Newell, 1982). Los patrones de coordinación posturales que emergerán dependerán de todos estos condicionantes y de cómo interaccionan entre ellos. Existe la posibilidad de que actúen de forma cooperativa o competitiva, ya que los diferentes condicionantes pueden desviar al sistema hacia direcciones opuestas o pueden cooperar en la misma dirección (Bardy et al., 1999; Marin et al., 1999; Oullier et al., 2002).

Los patrones de coordinación posturales pueden definirse cinemáticamente teniendo en cuenta la relación fase que existe entre la cadera y los tobillos, y se sugiere que la relación antifase favorecerá los grandes movimientos. Éstos pueden deberse al objetivo de la tarea o a las características de la superficie, como un suelo de alta fricción sin rigidez. En cambio, una relación en fase favorecerá movimientos que exijan pequeños movimientos de la cabeza o en superficies de baja fricción. Marin et al. (1999) demostraron esta hipótesis con una tarea en la que los sujetos debían mantener la postura erguida mientras con la cabeza seguían un movimiento anteroposterior de una señal. Ambos patrones (en fase y en antifase) emergieron en los sujetos, por lo que mostraron la utilidad de utilizar este parámetro, y se modificaban en función de la tarea y/o en función de las características de la superficie. Así, cuando las acciones posturales ocurren a la vez que otro tipo de movimientos, se combinan los diferentes modos de coordinación postural.

Otro ejemplo más cotidiano es el de recoger un objeto que esté en el extremo opuesto de una mesa. Mientras estemos de pie, el balanceo

característico del equilibrio humano estará concentrado en la rotación a partir de los tobillos, pero si nos inclinásemos hacia delante para recoger el objeto el balanceo se trasladaría a la cadera. Este tipo de transiciones se explicaba por la existencia de programas motores y por cambios entre los programas operantes en el nivel del SNC. No obstante, los últimos estudios muestran como estos cambios pueden ser consecuencia de la naturaleza autoorganizada del sistema postural, tal y como sugerían Marin et al. (1999) exhibiendo propiedades de las transiciones de fase en estados de no equilibrio entre atractores (Bardy et al., 2002). A pesar de esta afirmación, se tienen en cuenta el resto de posibles causas que pueden explicar los cambios entre los distintos patrones coordinativos:

- Límites mecánicos: Límites de las fuerzas y momentos de fuerza aplicados a la superficie de soporte o a las articulaciones, o límites en la amplitud de los movimientos corporales tolerados por esos patrones. Esta causa aislada no puede explicar las transiciones posturales debido a que no existe una correspondencia de 1:1 entre las condiciones mecánicas y los patrones de control postural.
- Coste metabólico: Las transiciones podrían producirse para minimizar el coste metabólico asociado al control del centro de masas del cuerpo. Este esfuerzo podría ayudar a que efectivamente se produjese el cambio, pero hay muchas situaciones en las que el mantenimiento del centro de masas sobre los pies no es el único objetivo, tal y como sucede en cualquier gesto deportivo. En esos casos, el cuerpo pretenderá maximizar la eficiencia de la acción.
- Consecuencias sensoriales: Las transiciones se podrían producir por cambios en la información que llega al SNC. Se ha observado como cambios en la información sensorial o vestibular, como quitar la visión, producen cambios en los

patrones de control postural (Corna et al., 1999, Horak et al., 1990)

- La autoorganización de los patrones posturales: Bardy et al. (2002) defienden que ésta es la explicación más plausible, y definen los patrones de coordinación postural como atractores en el espacio estado postural, y los cambios entre los patrones como transiciones de fase en estado de no equilibrio. Los argumentos anteriores caben dentro de esta hipótesis, ya que las fuerzas, los estímulos sensoriales o las órdenes del SNC serán condicionantes locales en esta perspectiva que participan en los cambios de patrones en la coordinación corporal global.

El considerar al sistema postural como un sistema dinámico ha provocado el estudio de los tipos de coordinación que existen entre las diferentes articulaciones, tal y como se ha descrito anteriormente. Bardy et al. (1999) también estudiaron la emergencia de patrones coordinativos posturales al añadir una tarea suprapostural de seguimiento de una señal con movimientos de la cabeza. Describieron el balanceo corporal en términos de relación en fase o antifase entre las articulaciones de la cadera y de los tobillos. Cuando aumentaban la amplitud de la frecuencia de movimiento de la señal, se producía un cambio brusco del modo antifase al modo en fase y a la inversa, y reconocieron así en este experimento las marcas de la multiestabilidad y las bifurcaciones en función de que el parámetro de orden adquiriera un valor crítico.

Pero para demostrar que realmente estos cambios eran autónomos y autoorganizados, Bardy et al. (2002) quisieron mostrar que se producía un incremento de la variabilidad de la relación fase entre las articulaciones en la zona de transición, reflejo de las fluctuaciones críticas; una tendencia del sistema a permanecer en la cuenca de atracción diferente en función de la dirección del cambio, prueba de la histéresis; y un aumento del tiempo de relajación después de una perturbación a medida que decrecía la distancia

con el punto de transición, el critical slowing down. Con este objetivo, 11 voluntarios realizaron un experimento similar al anterior, en el que debían permanecer de pie mirando una pantalla y utilizar movimientos de todo el cuerpo para seguir unas oscilaciones anteroposteriores que producía una señal. Al aumentar la frecuencia de las oscilaciones se observó un cambio cualitativo de la coordinación en modo en fase al modo antifase y a la inversa, y durante este cambio se observó el fenómeno de la histéresis y de las fluctuaciones críticas. En la figura 32 se muestra la zona de transición para un sujeto típico que participó en el estudio. Faltaba demostrar la existencia del critical slowing down en estas tareas, para lo que se experimentó con la presencia de perturbaciones repentinas en el movimiento anteroposterior de la señal. Los patrones de coordinación perdían estabilidad a medida que se acercaban a la zona de transición, aumentando así el tiempo de relajación necesario para retornar al patrón coordinativo anterior. Además, se observó que el modo en fase era más estable que el antifase.

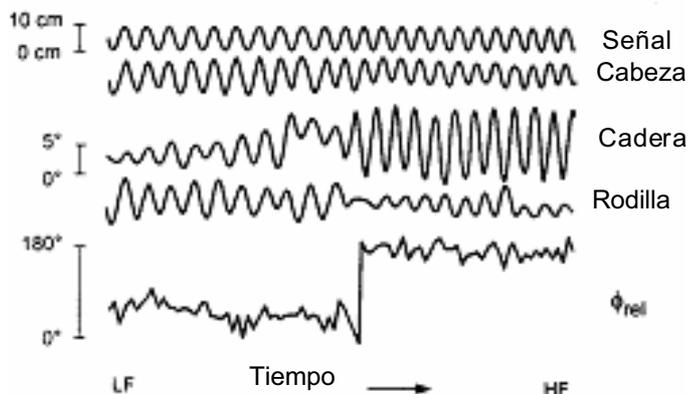


Fig. 32 Transición de Bardy: Región de transición para un sujeto típico mostrando el movimiento en fase entre la cabeza y la señal y el cambio de movimiento en modo en fase entre la cadera y los tobillos al modo antifase al aumentar la frecuencia del movimiento de la señal. Abajo se muestra la relación fase entre las dos articulaciones. LF: Baja frecuencia (Low frequency); HF: Alta frecuencia (High frequency) (Bardy et al., 2002).

Estos fenómenos de histéresis o de fluctuaciones críticas son difícilmente explicables desde el punto de vista del programa motor.

Otro estudio posterior de los colegas de Bardy (Oullier et al., 2002) analiza la influencia del tipo de tarea para que se produzcan los modos de coordinación descritos y los fenómenos característicos de una bifurcación. Trece sujetos realizaron una tarea muy similar a la propuesta por Bardy en la cual debían mantener una distancia constante de su cabeza con una señal que estaba en la pared frontal mientras ésta se movía en el plano anteroposterior. Otros trece sujetos debían mirar la oscilación sin necesidad de mantener ninguna distancia pero sin impedir tampoco el movimiento involuntario del cuerpo en respuesta a esta oscilación. Como era de esperar, la primera tarea produjo mayores amplitudes del movimiento de la cabeza y acoplamientos más fuertes entre la cabeza y la pared o entre los tobillos y la cadera, pero emergieron modos de coordinación similares en ambos casos en función de la frecuencia de movimiento de la pared. Este estudio parece demostrar la independencia entre la emergencia de los modos de coordinación en fase y en antifase y la tarea propuesta. Anteriormente, otros autores ya habían demostrado la importancia del acoplamiento visual para el mantenimiento de la postura y la mayor fuerza de éste ante un movimiento a más baja frecuencia que ante uno a más alta (Dijkstra et al., 1994), pero estos estudios añaden el tipo de acoplamiento intersegmental que se produce y la demostración de la fascinante aparición de nuevo de fluctuaciones críticas o critical slowing down.

Los métodos de análisis geométricos de la dinámica son en este contexto muy útiles para investigar la postura, ya que resaltan las relaciones entre los segmentos y su coordinación en vez de la acción de cada componente, con lo que se reduce la dimensión del patrón de coordinación a estudiar. Se podrán confeccionar modelos dinámicos para predecir las tendencias del sistema a cambiar de un estado a otro, a pasar de un atractor a otro. Los métodos analíticos requieren análisis cuantitativos que limitan excesivamente la experimentación (Riccio y Stoffregen, 1988). El comportamiento no será únicamente una secuencia de posiciones fijas, sino una secuencia de transiciones entre estados o configuraciones (Reed,

1982). Por este motivo, el movimiento en si puede ser más importante que el punto final de ese movimiento.

8- Aplicaciones de la TSD a los métodos de entrenamiento deportivo

En los anteriores apartados ya se ha insistido sobre la gran influencia que ha ejercido la visión mecanicista del ser humano en la moderna ciencia del entrenamiento deportivo. Mayoritariamente se asume el modelo de causalidad lineal en el que las mismas causas tendrán los mismos efectos (grandes causas-grandes efectos, pequeñas causas-pequeños efectos), similares causas tendrán similares efectos o no se producirán efectos sin su correspondiente causa. Siff y Verkhoshansky afirman que muchos de los problemas que surgen en la investigación de la fisiología deportiva son precisamente el resultado de aceptar métodos aislados y lineales basados en estos principios para el estudio de los sistemas biológicos y psicológicos interrelacionados y de excepcional complejidad (Siff, y Verkhoshansky, 1999). Si estas relaciones lineales fueran ciertas, y tal y como afirma Schöllhorn (1999), diferentes atletas con el mismo entrenamiento obtendrían los mismos resultados, o aumentando el entrenamiento (número de estímulos), obtendríamos mayor rendimiento (más número de efectos). Cualquier entrenador ha vivido como, desgraciadamente, esto no es tan sencillo. Aquello que a algunos atletas les impulsa al éxito a otros no les provoca cambios o incluso les puede llevar al fracaso; o mientras que un pequeño cambio en el entrenamiento consigue mejorar de forma sorprendente a un atleta, una estimulación repetida o el aumento de carga no provoca más que un estancamiento. Incluso en la literatura científica se presentan contradicciones de este tipo, como la poca correlación que existe entre el número de horas de práctica y el rendimiento deportivo (Van Rossum, 2000).

Debido a este tipo de paradojas, numerosos entrenadores no tienen en cuenta los resultados de estudios cuidadosamente realizados y se rigen más

por su propia experiencia, por el conocimiento de sus atletas (gracias a un seguimiento exhaustivo de los mismos) o por su intuición.

El entrenamiento deportivo recibe también notables influencias de las teorías cognitivas o de procesamiento de información ya explicadas anteriormente. Como parte de este proceso cognitivo se supone al atleta provisto de sistemas reguladores que le permiten comparar su actuación actual con el objetivo ensayado, tanto de forma continua, mientras se desarrolla el movimiento (closed-loop control), como al final del movimiento, comparando el resultado final con el pretendido (open-loop control). Según este modelo el entrenador debe definir previamente la tarea para permitir que sus pupilos dispongan de una referencia para comparar su rendimiento. Por esta razón, el aprendizaje y desarrollo de muchas tareas en entrenamiento deportivo se centran en la observación del modelo. Se pide al atleta que observe dicho modelo y lo reproduzca. Si no es capaz de reproducir el patrón de movimiento con precisión en las fases iniciales, irá progresando a través de la repetición y de la comparación de su ejecución con la respuesta de referencia (Davids, Handford y Williams, 1994; Ingvaldsen y Whiting, 1997, Temprado y Laurent, 1999).

Con este fin, la teoría del entrenamiento clásica propone la individualidad de los entrenamientos, pero tal y como lo define Balagué (2004), se propone un entrenamiento individualizado convergente, centrado en la búsqueda de soluciones y modelos únicos. La individualidad divergente, en cambio, no sólo irá dirigida a la entrada o input, a la selección de estímulos específicos para cada individuo, sino también a la salida o output, a la posibilidad de que cada deportista responda con soluciones diferentes, también individualizadas.

La teoría del programa motor también ha influido en la defensa de la especificidad de la práctica, tanto en el aprendizaje como en el entrenamiento. En el campo del entrenamiento de la fuerza, por ejemplo, se postula a menudo por esta especificidad argumentando la importancia del

entrenamiento en el ángulo específico del movimiento deportivo (Weir et al., 1994), la correlación del tipo de entrenamiento con el tipo de ganancia de fuerza (Rutherford et al., 1986) o con la velocidad específica (Ewuing et al., 1990). De forma más general, Sale y MacDougall (1981) apostaron en su día por la especificidad de la práctica al compararla con el entrenamiento basado en el uso de ejercicios de pesas generales, en el sentido de aproximar el movimiento en los entrenamientos al patrón del movimiento de competición en cuanto a la forma, la velocidad o el tipo de contracción. Se demuestra esta evidencia mediante estudios en los que los incrementos de fuerza son más grandes cuando el test es igual al movimiento de entrenamiento, cuando se evalúa el mismo tipo de contracción, la misma velocidad o la misma intensidad de la contracción. Este demostrado hecho no contradice en absoluto ninguna de las propuestas que se harán a continuación, ya que justamente lo que se pretenderá será acercarse más en el entrenamiento a la realidad competitiva.

Pero estas teorías tampoco resultan satisfactorias para explicar muchas de las situaciones vividas en la práctica. Es relativamente frecuente, y de forma especial en ciertas fases del entrenamiento, observar como algunos atletas son capaces de generar nuevos patrones de movimiento y mejorar su rendimiento con muy poca o nula práctica; incluso responder con modelos diferentes, no establecidos previamente por la técnica ortodoxa planteada por el entrenador. Otros, en cambio, no consiguen, a pesar de repetir y repetir el modelo establecido, reproducirlo con demasiada fidelidad.

El enfoque surgido de la teoría de los sistemas dinámicos para explicar el movimiento humano nos puede ayudar a solucionar parte de la problemática al enfocar el entrenamiento y las adaptaciones desde esta perspectiva. Según este enfoque, no es necesario que el atleta conozca con anterioridad la solución de una nueva tarea. La respuesta óptima emerge por un proceso de descubrimiento gradual a medida que se produce una compleja interacción entre los componentes del comportamiento motor y la tarea. La práctica o la exposición a determinadas condiciones ambientales puede

guiar, facilitar o alterar la formación de patrones de movimiento diferenciados, dependiendo de las condiciones iniciales del sistema. De hecho, algunos estudios demuestran que las instrucciones que pretenden describir y guiar el movimiento de los sujetos interfieren incluso negativamente en el aprendizaje, por lo que se propone que se explore las posibilidades o que se den instrucciones relacionadas con el resultado de ese movimiento sobre el medio (Hodges y Franks, 2002; Wulf y Prinz, 2002).

El papel del entrenador se ve afectado por esta perspectiva. Si asumimos la concepción del ser humano como un sistema dinámico complejo, no podemos aceptar que el entrenador conozca exactamente la respuesta adecuada para cada situación. Sin embargo, de la misma forma que los matemáticos buscan las ecuaciones que descifran y modelan la dinámica intrínseca de los sistemas, los entrenadores pueden explorar la dinámica intrínseca de sus deportistas. Conocer las condiciones iniciales al máximo para proponer estímulos que faciliten la emergencia de respuestas divergentes, tal y como expondremos a continuación.

Paralelamente, el deportista tampoco podrá considerarse un simple receptor de estímulos. Es frecuente cuestionar la eficiencia de un entrenador por el hecho de que, por ejemplo, se lesionen sus deportistas o el equipo no rinda como se espera. En cambio, pocas veces se plantea la posibilidad de que el sujeto se lesione por su poca implicación en el proceso de entrenamiento o por el poco conocimiento que a veces tienen de las reacciones de su propio organismo. Es evidente que el entrenador será el que deba ayudarles también en ese aspecto, pero la adquisición de una mayor conciencia corporal y el aprender a entrenar globalmente y a involucrarse de forma más activa en el entrenamiento es un proceso largo que requerirá un gran esfuerzo por parte de todos los implicados.

No pretendemos cuestionar la posible efectividad de los métodos tradicionales de entrenamiento basados en repeticiones de ejercicios y cargas crecientes de trabajo, sino plantear que se pueden conseguir los

mismos resultados de forma más breve, menos agresiva y probablemente más enriquecedora para el individuo. No obstante, también hay aspectos del entrenamiento tradicional que consideramos criticables e incluso perjudiciales para los atletas, y que son fácilmente mejorables si se considera al individuo como un ser global que interactúa con él y con su entorno.

A partir de lo explicado hasta el momento, se presentan a continuación posibles aplicaciones para el entrenamiento deportivo. Estas propuestas pueden aplicarse a todo tipo de deportes. En el caso de los deportes de equipo, la variación constante de las condiciones de juego es evidente, por lo que el aprender a adaptarse a esta variación será de gran utilidad. En los deportes individuales, las propuestas se dirigen principalmente al método utilizado para aprender la técnica más eficaz para realizar cualquier acción motriz. Y en todos ellos, se podrá aplicar el respeto hacia el ser global y único que caracteriza a todo ser humano. En nuestra opinión, todas las propuestas y conclusiones surgidas de los estudios sobre aprendizaje y control motor descritas anteriormente pueden aplicarse al entrenamiento, ya que éste no será más que un aprendizaje o proceso de adaptación constante.

Cada aspecto por separado ya se utiliza en diferentes propuestas, pero es realmente un reto el conseguir entrenar integrando todos estos conceptos. La nueva perspectiva representa una excitante invitación a los científicos del rendimiento para dar respuesta a las preguntas que se generan desde una óptica diferente a la vigente. Sitúa además al entrenador frente al importante reto de encontrar fórmulas más eficaces y acordes con la naturaleza no lineal de su objeto de trabajo.

8.1- Individualización del entrenamiento

Los programas de entrenamiento deberían considerar las características individuales de cada atleta, pero no sólo de forma general, sino también la situación individual en el momento de someter al individuo a la carga propuesta. Además, y tal y como se ha comentado anteriormente, esta individualidad debe de tenerse en cuenta al proponer estímulos y al valorar las respuestas. Actualmente, cuando se habla de individualidad del entrenamiento, se suele interpretar como una diferenciación en los programas de entrenamiento para adaptarlos a cada deportista, pero no se suele contemplar la posibilidad de que cada uno de ellos responda de manera distinta.

Esto puede lograrse dejando que el atleta participe activamente en el proceso de entrenamiento (Nitsch y Munzert, 2002). Las instrucciones y comunicaciones retroactivas no deberían orientarse únicamente hacia parámetros externos, relacionados con la trayectoria del movimiento o con el resultado de ese movimiento sobre el medio como defendían algunos autores (véase apartado 5.3.2). También deberían de enfatizar criterios de vivencia y de autoconocimiento corporal. En el entrenamiento clásico de la fuerza, por ejemplo, se busca esta individualización a la situación presente con métodos como el control de la intensidad según la mínima velocidad y/o potencia aceptada. Se utilizan dispositivos para controlar la velocidad a la que se está ejecutando las repeticiones de cada serie de ejercicios y se para en el momento en que no se puede realizar a la velocidad elegida previamente, sin determinar con anterioridad el número de repeticiones (Tous, 1999). En el entrenamiento de la resistencia existe una mayor tradición en esta individualización, considerando parámetros como la frecuencia cardíaca para adaptar el programa planteado a la situación actual del atleta.

Íntimamente relacionada con este concepto, está la consideración del estado inicial del sujeto y de la distribución de sus atractores. Para aprender un

nuevo movimiento o técnica deportiva se deberá tener en cuenta los movimientos espontáneos que surgen del sujeto. Éstos afectarán al proceso y condicionarán el progreso y la estabilidad del aprendizaje. Hemos descrito ya multitud de experimentos relacionados con el aprendizaje de movimientos cíclicos con una relación fase distinta a la que atrae al sujeto, y como era importante para este fin la desestabilización del atractor existente. Esto es fácilmente trasladable al deporte cuando queremos modificar aspectos de una técnica ya conocida. No bastará con que el entrenador corrija los “errores” del atleta, sino que se deberán buscar formas para que el sujeto pierda el “hábito” que ya tiene de antemano. Estas formas se explican en el apartado 8.5, en el que se describen diversos tipos de facilitadores relacionados con el medio o el entorno en el que se desarrolla el deporte.

El otro aspecto a tener presente en cuanto a la individualización del entrenamiento es el de no buscar el movimiento ideal siguiendo modelos externos de otros individuos, como se suele hacer en el aprendizaje de cualquier técnica deportiva. La muestra de un modelo, o las instrucciones referidas a ese modelo, pueden incluso interferir negativamente en el aprendizaje (Hodges y Franks, 2002). Existirá una técnica ideal para cada situación y para cada individuo, por lo que habrá que entrenar al sujeto a adaptarse al cambio en vez de a copiar el modo de hacer de otro.

En esta forma de entrenar o de aprender, a menudo el atleta no tendrá una idea preconcebida del movimiento, lo que facilitará que esté más atento a las sensaciones y fuerzas reactivas que experimenta y por tanto más abierto a entender cómo se organiza su sistema. El entrenador podrá aprender también del atleta y de las estrategias que éste descubre, lo que puede facilitar o sugerir el tipo de instrucciones o de métodos de aprendizaje que serán más efectivos. El entrenamiento diferencial, que se explicará posteriormente, el aprendizaje por descubrimiento, o la reducción de grados de libertad de que dispone el atleta en la dirección del aprendizaje deseado son ejemplos de cómo entrenar para este fin.

El origen en el aprendizaje motor de la aplicación de la TSD al entrenamiento ha hecho que la mayoría de estudios tengan por objeto la mejora o aprendizaje de un gesto técnico. No obstante, hay que recordar que las aplicaciones son infinitas, y que la dinámica compleja y no lineal del ser humano se da en todos sus sistemas y subsistemas. En el apartado de aplicaciones a la fisiología ya se han mostrado ejemplos de ello, pero insistimos para enfatizar que todo el entrenamiento puede enfocarse bajo esta perspectiva. El siguiente punto explica algunas opciones para entrenar las capacidades físicas básicas de forma más respetuosa con la naturaleza no lineal del ser humano.

8.2- Globalización del entrenamiento

La concepción del entrenamiento basada en la división en componentes y en la mejora de las funciones aisladas y enfocada hacia parámetros microscópicos debería incorporarse a una visión global, orientada a la persona en su conjunto. Se pueden proponer entrenamientos más centrados en una capacidad que en otra o en un aspecto o en otro, pero siempre teniendo en cuenta la influencia de todo el organismo.

El entrenamiento más habitual de las capacidades físicas básicas está claramente influenciado por el reduccionismo. En el entrenamiento de la fuerza, por ejemplo, es común entrenar cada músculo de forma independiente. Además, se potencia el fortalecimiento de la musculatura encargada del movimiento, olvidando la musculatura encargada de la estabilización, que evidentemente participará en la ejecución de cualquier movimiento, tanto deportivo como cotidiano. Con este fin, se diseñan máquinas de musculación que aíslan los músculos que se pretende fortalecer, y añaden un soporte externo para estabilizar y facilitar la adaptación de las zonas del cuerpo consideradas como débiles (véase fig. 33). Este tipo de protección puede ser muy beneficioso para evitar lesiones en principiantes o para objetivos muy concretos, pero el uso exclusivo de

este tipo de prácticas llevará al deportista a carencias importantes. El atleta o la persona que entrena en el gimnasio, una vez salga de éste, se enfrentará a situaciones en las que el movimiento lo realizará con todo el organismo de forma sinérgica y sin soportes externos, y deberá superar situaciones inesperadas y constantemente cambiantes, por lo que habrá que prepararle para ello. El entrenamiento analítico puede ser por tanto la causa de muchas lesiones para las que a menudo no se encuentra explicación.



Fig. 33 Ejemplo de máquina popular de musculación en la que se protege la columna vertebral.

También se proponen mayoritariamente ejercicios en cadena abierta. En éstos cada segmento corporal actúa de manera independiente, y el funcionamiento de cada uno de ellos no resultará afectado por el conjunto de los demás segmentos. En cambio, en ejercicios de cadena cerrada, como podría ser la clásica sentadilla, la fuerza de un segmento debe sincronizarse con la estabilidad de otro segmento o con la flexibilidad de otro. Será más

interesante el uso de ejercicios de cadena cerrada, ya que es la forma en la que generalmente se desarrolla cualquier movimiento deportivo. En estos ejercicios de cadena cerrada puede integrarse también el entrenamiento de la musculatura estabilizadora si los ejecutamos sin soportes externos y con la postura adecuada, y el entrenamiento de la flexibilidad si buscamos una amplitud máxima (siempre y cuando sean movimientos seguros) (véase fig. 34).



Fig. 34 Atleta realizando un ejercicio de fuerza centrado en los grupos musculares extensores y aductores de los brazos en el que se mantiene una postura correcta a la vez que se fortalece la musculatura estabilizadora de la columna vertebral. Al mantener los talones en el suelo, también se entrena la flexibilidad del tríceps sural.

El entrenamiento de flexibilidad también está basado en la individualización de la musculatura, y suele entrenarse de forma pasiva y con estiramientos estáticos. Sin embargo, el estiramiento de un músculo produce compensaciones en el resto de la cadena muscular con que se relaciona ese músculo, por lo que el ejercicio no será plenamente efectivo si no se estira toda la cadena de forma simultánea. Esto se puede conseguir buscando posiciones que respeten estas cadenas y con la ayuda de la respiración y el estiramiento activo con contracciones isométricas o incluso excéntricas (Souchard, 1996). Además, el entrenamiento de la flexibilidad no debería de separarse tan claramente del de la fuerza, y deberían combinarse para conseguir un cuerpo verdaderamente funcional y capaz de reaccionar ante cualquier situación. Esta combinación puede ser fruto del aumento de amplitud de los movimientos o de la realización de estiramientos activos y dinámicos. En estos últimos integramos evidentemente el entrenamiento de la fuerza, a lo que se puede añadir el de la técnica buscando los ejercicios adecuados.

Los principios ya descritos de la teoría de la Gestalt, de la autoorganización y del holismo en general nos sugieren que la determinación y este entrenamiento aislado de componentes individuales del movimiento permiten predecir u optimizar sólo de forma muy limitada el rendimiento motor global. Nitsch y Munzert (2002) describen en el ámbito deportivo cómo la modificación de un único elemento puede conllevar la del sistema en su conjunto, como podría ser la modificación de un componente de la condición física. Estos autores consideran que pueden producirse estados de organización cualitativamente nuevos mediante una fluctuación mínima de algún elemento del sistema. Esta afirmación ya se ha ilustrado ampliamente en apartados anteriores al explicar la dependencia sensible a las condiciones iniciales y con la descripción de cambios abruptos que se producen con una pequeña modificación del parámetro de control.

Así, además de la influencia de todo el organismo de forma global, habrá que tener en cuenta también la influencia del medio, en el que se

encontrarán a menudo otros organismos. Éste es el caso de los deportes colectivos, en el que ya se habla de entrenamiento integrado para definir la metodología de entrenamiento que intenta precisamente tener en cuenta estos condicionantes. Se propone el acercar los entrenamientos a la competición, simulando al máximo los aspectos que en ella aparecen, solicitando a los jugadores que efectúen acciones en las que intervengan diferentes factores físicos, técnicos y tácticos mezclados entre sí de manera simultánea. Dentro de las propuestas que integra esta metodología también se cita la necesidad de variar el trabajo físico o la de fijar aprendizajes técnicos en diferentes condiciones, como la fatiga (Espar, 2002).

Finalmente, se sugiere también el entrenamiento global de las tareas, sin descomponerlas en partes. Ya se explicaron en el apartado 5.4.2. los estudios relacionados con el golpeo de balones. Éstos mostraban que la práctica de una tarea de forma descompuesta podía llevar a una exploración de una región incorrecta del espacio.

8.3- El aprendizaje o el entrenamiento basado en la variación de estímulos

Uno de los principios del entrenamiento en función de los procesos de adaptación más conocidos es el principio de variabilidad de la carga (Solé, 2002; Zintl, 1991). Para iniciar los procesos de adaptación, se proponen cargas de entrenamiento variadas que eviten la monotonía y la acomodación a los estímulos. Según Zintl (1991), cuando se aplica una estimulación monótona, el cuerpo obedece a la regla de los niveles de estimulación y se produce una disminución del efecto que incrementa el rendimiento. Por este motivo, el individuo se estanca. No obstante, modificando el estímulo de carga se puede volver a alcanzar el nivel de estimulación anterior. Esta variabilidad debe tener un límite, que depende de los objetivos, de la especialidad y de las necesidades, ya que se considera que un rápido

cambio de los medios no permite sacar rendimiento a los mismos, y un alejamiento de la estructura del ejercicio de competición reduce el efecto. Esta variabilidad alude especialmente a los métodos y a los regímenes fisiológicos específicos (intensidad, estructura de los descansos, volumen, regímenes de contracción) (González y Gorostiaga, 1997). La variación se realiza con el objetivo de no frenar el progreso del atleta por el estancamiento que produce la repetición, por lo que, en este caso, no hará falta variar la estructura del ejercicio y alejarlo de la técnica que se considera adecuada o específica. No se pone en duda la eficacia de este tipo de variabilidad. De hecho, no está en desacuerdo con los principios de comportamiento de los sistemas dinámicos, ya que según la teoría del entrenamiento clásico es necesario estimular al sujeto para que pierda su “estado de forma” y pueda producirse la supercompensación. Es decir, se necesita desestabilizar la distribución de sus atractores para que el sujeto se reorganice y adquiera un nuevo estado. No obstante, esta visión alude especialmente al entrenamiento condicional, pero no parece que se tenga en cuenta la necesidad de adaptar la técnica a infinidad de situaciones y a la necesidad del atleta de optimizarse a través de dar más adaptabilidad y flexibilidad a sus sistemas.

En el campo del aprendizaje sí que se alude a esta necesidad, y en la educación física de base se proponen tareas muy variadas. Diversos autores analizan la forma de aprender de los bebés, u observan situaciones de juego infantil, en las que los niños no repiten sino que constantemente varían la forma de realizar las tareas. Según Ruiz (1998), durante el aprendizaje deportivo se debe dotar a los sujetos de un mayor conocimiento de las acciones mediante la variación de las tareas. Otro método de aprendizaje adaptado a los adultos pero basado plenamente en la observación de los bebés, en la variación de los estímulos y en el respeto de la individualidad del aprendizaje es el método Feldenkrais®. Este autor pretende ampliar y afinar el control general que se tiene sobre los músculos ofreciendo la oportunidad de explorar por uno mismo sus movimientos y descubrir las nuevas posibilidades mediante ejercicios claramente definidos. Cada uno

aprende a juzgar lo que es cómodo y fácil para él. Los ejercicios son muy distintos entre sí y, mediante la práctica, se toma conciencia de las tensiones, de la falta de libertad del movimiento. Se realizan posiciones inusuales para explorar nuevas posibilidades y desorganizar al sistema nervioso de sus costumbres o hábitos (Feldenkrais, 1985). En la base teórica de este método encontramos muchos paralelismos con la teoría de los sistemas dinámicos, tal y como describen Buchanan y Ulrich (2001). Respetando el principio de autoorganización, Feldenkrais considera que los alumnos tienen comportamientos autoorganizables que emergen de la conjunción de elementos extrínsecos e intrínsecos. También se tiene en cuenta la presencia de atractores o hábitos, y en ambas perspectivas se utilizan las perturbaciones como instrumento para modificar el comportamiento. Ambas respetan la gran variedad de sistemas que afectan el comportamiento y enfatizan la continua interacción entre la percepción y la acción. Entre las propuestas prácticas que ofrece el método destacamos aquellas que consideramos más interesantes de cara a aplicarlo a la optimización del entrenamiento:

- Manipulación del entorno para desestabilizar los atractores existentes y ayudar a que emerjan nuevos. Según Feldenkrais, esto se puede conseguir mediante diferentes estrategias:
 - Alteración de la orientación espacial
 - Alteración del medio utilizando instrumentos (rodillos, pelotas suizas...)
 - Modificar la superficie de apoyo: practicar en el agua, en posiciones más estables...

- Reducir el esfuerzo para aprender, ya que será más fácil que se produzcan pequeños cambios en la eficiencia muscular. En el inicio del aprendizaje, el método Feldenkrais® propone movimientos minúsculos del cuerpo, pero estos consiguen provocar cambios en la organización del movimiento global del

cuerpo. Feldenkrais tampoco confía en los estiramientos forzados o en las manipulaciones, ya que considera que el movimiento se mejorará con la acción y con el entorno adecuado.

- Facilitar la emergencia de patrones individuales, y no copiar los considerados como “normales”, tanto para aprender nuevos movimientos como para recuperarse de alguna lesión.

Algunos estudios sobre aprendizaje de tareas deportivas que se basan en la perspectiva de la TSD llegan a conclusiones similares. Delignières et al. (1998), después de realizar un estudio comparativo entre los patrones coordinativos de gimnastas noveles y expertos (véase apartado 5.3.2), llega a la conclusión de que los entrenadores y profesores no deberían fijarse únicamente en los “errores” que muestran sus alumnos o atletas. Deberían tener en cuenta la dinámica intrínseca de éstos y ayudarles a desestabilizarla, para posteriormente explorar el movimiento con el fin de encontrar una solución óptima.

La propuesta de variar los estímulos en el aprendizaje ya fue lanzada por Bernstein con el objetivo de dominar cualquier tarea motriz (Beek, 2000). Bernstein consideraba que para ser un experto se debe dominar la tarea en todas las situaciones posibles, pero como las condiciones nunca son las mismas la práctica debe encaminarse no sólo a conseguir un automatismo de la tarea sino a desarrollar estrategias motrices flexibles que se adapten a los cambios del medio. Para este autor, la práctica no consistía en repetir la posible solución, sino en el proceso de solucionar los problemas mediante técnicas que se modifican y perfeccionan en cada “repetición”. La práctica será un particular tipo de repetición sin repetición (Bernstein, 1967).

Posteriormente, la práctica variable de Schmidt y la interferencia contextual propusieron también la variación de las tareas durante el aprendizaje. Se ha estudiado el aprendizaje de tareas deportivas bajo esta perspectiva, como la producción de una determinada intensidad de fuerza practicando únicamente

la intensidad que se evaluará o incluyendo variaciones de esta intensidad. Shea y Kohl (1990) observaron que se retenía mejor el aprendizaje al utilizar variaciones. Landin et al. (1993) analizaron el aprendizaje de un lanzamiento a canasta de baloncesto practicando únicamente la distancia desde la que se lanzaba en el test, o practicando también otras distancias además de la anterior. Durante la práctica el aprendizaje fue similar, pero el test de retención fue mejor en el grupo que incluyó la práctica variable.

Lo mismo sucede con el entrenamiento, que no debe hacer exclusivamente su énfasis en la repetición como el medio más importante para mejorar el rendimiento sino proveer al atleta de un amplio espectro de situaciones que le permita generar cambios en la coordinación, modificar la dinámica intrínseca del sistema y proveer de un nuevo grupo de experiencias que le lleven al descubrimiento de la respuesta final. Vemos que queremos llegar un poquito más lejos que en la propuesta de la práctica variable. Por otro lado, dicha respuesta no puede ser nunca fija o estática en un organismo en constante cambio y evolución. Si consideramos que no es posible reproducir exactamente las condiciones iniciales en las que se realiza un trabajo determinado el concepto de repetición pierde también su sentido.

Ya en 1935, Bernstein nos dice que los movimientos nunca se pueden repetir exactamente (Bongaardt y Meijer, 2000) y un estudio realizado por Schöllhorn (1999), después de analizar durante un año a dos lanzadores de élite con datos de diferentes categorías de variables y diferentes niveles de observación, llega a la misma conclusión. Se realizó un análisis cinemático y dinámico no lineal durante un año de los lanzamientos de dos lanzadores de disco. En los últimos 200 ms del lanzamiento se observaron constantes fluctuaciones de diferentes parámetros, siendo imposible encontrar dos movimientos iguales. Tal y como plantea el autor, estas observaciones provocan la duda sobre la validez de los entrenamientos basados en repeticiones de un mismo movimiento. La primera razón a la que se alude es precisamente la imposibilidad de repetir exactamente un mismo ejercicio. Pero la segunda razón la consideramos más interesante, ya que alude a la

individualidad de los patrones de movimiento. Un mismo sujeto nunca repite exactamente un movimiento, pero en cambio sí que sigue un patrón que será único para él y podrá distinguirse del de cualquier otro. Ello pone en duda el intentar reproducir exactamente una técnica creada por y para otro atleta en lugar de explorar el movimiento ideal para cada sujeto.

La aplicación del mismo procedimiento de reconocimiento del patrón no lineal que se había utilizado con los lanzadores se aplicó a 20 atletas analizando las fases de contacto con el suelo y las fases de vuelo en carreras a diferentes velocidades (3-6 m/s) pudiendo distinguir el patrón individual de cada atleta en un 90% de los casos (Schöllhorn y Bauer, 1998).

Jaitner et al. (1998, 2001) también identificaron la individualidad de los modelos de movimiento sólo por la complejidad de éste durante la fase corta de contacto con el suelo en saltadores de longitud.

Estos autores defienden la inutilidad de repetir movimientos de una técnica estandarizada, partiendo de un modelo ideal, aunque eso no significa que no debamos ayudar a los atletas a mejorar su técnica teniendo en cuenta factores biomecánicos o fisiológicos que puedan favorecer su ejecución.

Una de las proposiciones más desarrolladas para variar los estímulos de entrenamiento respetando los principios de la teoría de los sistemas dinámicos es la del entrenamiento diferencial de Schöllhorn.

8.3.1- El entrenamiento diferencial

Según Schöllhorn (1998), para resolver el problema de la individualidad se pueden proponer dos tipos de soluciones: establecer un modelo ideal de entrenamiento para cada individuo (lo que probablemente supone una difícil, cara y posiblemente irresoluble tarea) o bien ofrecer al atleta una gran

variedad de ejercicios para inducir un proceso de autoorganización de su aprendizaje y evolución. El entrenamiento diferencial favorece esta segunda opción, aprovechando la necesidad de fluctuar o de producir errores para aprender. Se considera a las fluctuaciones como desviaciones de un punto de referencia, por lo que representan diferencias que permiten al sistema reaccionar y adaptarse constantemente a los cambios. Es fácil observar como, desde esta perspectiva, la variedad de ejercicios persigue un objetivo diferente al que postula la práctica variable, derivada de la teoría del esquema (Schmidt, 1982; Shea y Kohl, 1990), o al de la interferencia contextual (Shea y Morgan, 1979) a pesar del planteamiento aparentemente común. La práctica variable se basa en un modelo cognitivo, mientras que la perspectiva de los sistemas dinámicos da otra explicación a la utilidad de la variación de la práctica. Se defiende que la realización de una variedad de ejercicios hace que el sujeto descubra de forma espontánea patrones individuales de movimiento que le permiten responder de una forma más eficaz a las tareas motrices planteadas. Por ello las soluciones serán siempre individuales. No obstante, las variaciones no serán arbitrarias, sino que ciertos elementos de la técnica de aprendizaje deberían de incluirse en la práctica (Schöllhorn, 1998). También Neumaier (2002) propone una variación de la técnica en el entrenamiento no máxima, sino óptima, y alude a las diferencias en cuanto a la aplicación de la variabilidad por parte de los investigadores para explicar los resultados contradictorios de algunos estudios. Otra diferencia fundamental entre la práctica variable y el entrenamiento diferencial es que en éste, al igual que en la interferencia contextual, las variaciones no hacen referencia únicamente a lo que los defensores de la práctica variable definen como GMP, tal y como veremos a continuación.

Según Schöllhorn, los mecanismos por los cuales se explican estas adaptaciones hacen referencia a la interpolación, la extrapolación y a la ya explicada autoorganización. La interpolación consistirá en alcanzar un nuevo estado, que se encuentra en el espacio existente entre dos estados conocidos (movimientos almacenados). La extrapolación consistirá en que el

nuevo estado, conseguido a partir también de dos estados conocidos, se encuentra fuera del espacio de estos dos estados. Estos conceptos provienen del estudio de redes neuronales artificiales y su funcionamiento.

El entrenamiento o aprendizaje diferencial supondrá aprender de las diferencias a través de ejercicios muy versátiles. Más específicamente, Schöllhorn propone las siguientes indicaciones:

- Variación de las condiciones iniciales y/o finales de un movimiento
- Cambio en la magnitud de las variables
- Cambio en la evolución o desarrollo del movimiento con respecto a su duración absoluta y relativa y al ritmo

Éstas se aplicarán sobre el ángulo articular, la velocidad angular articular, o la aceleración angular articular. Podemos observar que se añaden otras variaciones a las propuestas por la práctica variable, centradas en la secuencia de los elementos del movimiento, el timing relativo y las fuerzas relativas, y que se incluyen otras de la interferencia contextual. En esta última propuesta se sugiere que las habilidades pueden mejorarse modificando no sólo aspectos temporales o cuantitativos, sino también cambiando la forma de la configuración espacial del movimiento y los grupos musculares participantes (Magill y Hall, 1990)

Evidentemente, se tendrá en cuenta que ya se producen diferencias en cuanto a las condiciones internas cambiantes como la fatiga o el estado psicológico. El autor alude incluso a la posibilidad de entrenar utilizando los “errores” de la técnica. Finalmente, Schöllhorn también propone una progresión en la variabilidad de los estímulos empezando por una variación inicial en la geometría del movimiento, para posteriormente variar la

velocidad o la aceleración, desestimando las propuestas que sugieren una práctica variable aleatoria.

Schöllhorn y sus colaboradores (Schöllhorn et al., 2001) ponen en práctica su propuesta en diferentes deportes. El autor dividió a un grupo de 15 atletas en dos. El primer subgrupo realizó un entrenamiento dos veces a la semana de 90 minutos de ejercicios de esprint que coincidían dinámicamente y cinemáticamente con detalles seleccionados del movimiento global del esprint y enfatizando las diferencias entre los ejercicios en vez de la repetición. El segundo realizó entrenamientos tradicionales de esprint 5 días a la semana también durante 90 minutos. Después de 6 meses el grupo de entrenamiento diferencial había mejorado más la velocidad del esprint que el de entrenamiento tradicional. Aunque a raíz de este estudio no podemos afirmar que realmente el entrenamiento diferencial haya sido la causa de la mejora debido a la metodología utilizada, sí que sugiere que como mínimo es un método de entrenamiento efectivo.

Schönherr y Schöllhorn (2003) también diseñan un estudio clásico de pre-post test con dos grupos de jugadores de baloncesto con poca experiencia en el que se valora el aprendizaje del tiro libre. Ambos grupos entrenaron un día a la semana durante cuatro semanas. El primero entrenó siguiendo la metodología tradicional realizando un gran número de repeticiones con instrucciones con el fin de reducir los errores o los grados de libertad. El segundo entrenó sin repetir un solo ejercicio durante las cuatro sesiones. En el pretest no se encontraron diferencias significativas entre los puntos obtenidos por ambos grupos, mientras que en el posttest mejoraron significativamente más los integrantes del segundo grupo.

Trockel y Schöllhorn (2003) realizan un estudio similar con jugadores de fútbol que pretenden mejorar el tiro a portería. El test consistía en realizar 35 chutes desde siete posiciones distintas, desde las que se obtenían diferentes puntuaciones en función de la zona en la que encajaban el balón en la portería. Veinticuatro jugadores experimentados divididos en dos grupos

entrenaron dos veces por semana durante 6 semanas. El primer grupo entrenó de forma tradicional, mientras que el segundo siguió los principios del aprendizaje o entrenamiento diferencial. En el pretest no se obtuvieron diferencias significativas, pero en el posttest, el segundo grupo obtuvo resultados significativamente mejores.

Finalmente, Beckmann y Schöllhorn (2003) estudian si estas aparentes mejoras con el entrenamiento diferencial tienen una mayor retención que con el tradicional. Siguiendo el mismo diseño de estudio que en los dos casos anteriores, dos grupos de 12 estudiantes sin experiencia en el lanzamiento de peso entrenaron dos veces por semana durante cuatro semanas. En los tests realizaron tres lanzamientos de peso y se registró la media de los tres. Se realizaron dos tests más que en los estudios anteriores, al cabo de dos y cuatro semanas de haber finalizado el periodo de entrenamiento. En el pretest tampoco se obtuvieron diferencias significativas entre ambos grupos, pero en los tests siguientes se observaron mayores mejoras en el grupo de entrenamiento diferencial y una mayor retención, siempre de forma significativa.

Rein y Simon (2003) también ponen en práctica esta metodología de entrenamiento con un grupo de 16 corredores de larga distancia. Ocho de ellos realizaron durante tres meses un entrenamiento adicional de variación de la técnica, mientras que los ocho restantes continuaron con su entrenamiento habitual sirviendo así de grupo control. Las variaciones se centraron en la dimensión espacial, modificando la amplitud de los ángulos de las articulaciones implicadas en el movimiento, en la dimensión muscular, modificando la tensión, y en la dimensión dinámica, modificando la velocidad de la carrera. Las variaciones fueron más grandes al principio del periodo para favorecer una estabilización de la técnica al final. Se filmó la carrera de todos los atletas para valorar la variabilidad de su técnica identificando el patrón de correr como un atractor local y las variaciones como fluctuaciones. Se observó como la variabilidad de la técnica en el grupo experimental decreció de forma significativa mientras que el grupo control no experimentó

cambios significativos. Concluyeron por tanto que este tipo de entrenamiento favorece la estabilización de la técnica, lo que puede ayudar a superar situaciones externas cambiantes.

Se ha estudiado también la aplicación del entrenamiento diferencial en la mejora del salto vertical, concretamente del drop jump (Jaitner y Pfeiffer, 2003). Doce jugadoras de voleibol realizaron un pretest de 5 drop jumps desde diferentes alturas y de 4 lanzamientos de pelota saltando a la máxima altura posible. Se dividió al grupo en dos y entrenaron dos veces por semana durante 12 semanas, realizando de 80 a 160 saltos por sesión. El primer grupo realizó saltos desde la misma altura, mientras que el segundo varió la altura y el orden de forma aleatoria. Se repitió el test al final del periodo y no se obtuvieron diferencias significativas entre ambos grupos, aunque el segundo había mejorado más en el lanzamiento del balón. No obstante, consideramos que el entrenamiento diferencial debería de haber incluido más variedad en los ejercicios y no una simple variación en la altura o en el orden de ejecución, ya que esto es lo que se suele hacer en el entrenamiento tradicional. El mismo autor (Jaitner et al., 2003) encuentra resultados favorables utilizando también el entrenamiento diferencial para la mejora del paso de vallas en esta modalidad de atletismo en mujeres, y Wagner et al. (2003) también obtienen mejoras aplicándolo al lanzamiento en balonmano.

Todos estos estudios parecen demostrar la utilidad del entrenamiento diferencial. No obstante, consideramos que estudios más individualizados permitirían optimizar este método de entrenamiento, en vez de los tradicionales estudios de grupos, aunque sean más publicables.

Pero lo que sí que podemos afirmar es que la oferta variada de ejercicios tiene además otras ventajas para trabajar en grupo, ya que cada sujeto puede llegar a su solución sin precisar de tantas instrucciones individuales por parte del entrenador. Se incrementa de este modo la responsabilidad del

atleta en el proceso de entrenamiento y se satisfacen mejor los aspectos motivacionales.

Otra de las ventajas que ofrece este tipo de trabajo y la aplicación de este nuevo enfoque es disminuir las lesiones por sobrecarga o los estados de sobreentrenamiento a los que se llega con la aplicación de los principios que rigen el entrenamiento actual basado en la repetición (más carga, más efectos). La fórmula más popular de entrenar utilizando centenares de repeticiones supone seguramente en la mayoría de los casos una innecesaria sobrecarga de músculos y articulaciones, además de causar una mayor fatiga psicológica. Sin embargo, no hay que olvidar que la variación de estímulos tiene sus riesgos de lesión, por lo que se deberán proponer ejercicios seguros y a atletas que ya dominen y controlen su cuerpo. Un trabajo previo de control postural y de autoconocimiento se hará imprescindible, ya que así las variaciones se realizarán respetando la alineación corporal que permite la ejecución de cualquier movimiento minimizando el riesgo de lesión.

Muchos entrenadores utilizan ya metodologías que están muy acordes con esta propuesta, a pesar de que no se basen en ninguna teoría demostrada. Es muy frecuente con principiantes, pero también en los deportes de equipo, en donde el entrenamiento suele dividirse en estructural (hipertrofia), funcional (coordinación intra e intermuscular) y en entrenamiento cognitivo. En este último, las ganancias del entrenamiento estructural y funcional se transfieren a las tareas específicas (técnico-tácticas) de cada deporte (Tous, 1999). Las propuestas para mejorar la metodología del entrenamiento cognitivo se basan en la presentación de estímulos muy variados para buscar la autooptimización del atleta. Es necesario diseñar tareas que progresen de lo simple (general) a lo complejo (específico) en función de las características del deporte, incluyendo también por ejemplo la toma de decisiones. El paralelismo del denominado entrenamiento cognitivo con la propuesta del aprendizaje o entrenamiento diferencial es evidente, aunque

se diferencien principalmente en la justificación teórica y en la forma en la que se diseñan y se programan las tareas.

Buekers (2000) también propone variar las propuestas de entrenamiento al inicio de la práctica deportiva, aunque cree que debería disminuir en estadios posteriores del aprendizaje teniendo en cuenta las demandas de la disciplina específica. Pero a su vez, cuando la técnica específica se aprende debe adaptarse a multitud de situaciones distintas, por lo que se debe realizar la práctica en situaciones muy variadas. Por lo tanto, sigue siendo válida la práctica variada, pero en vez de modificar la tarea se modifica las condiciones en las que se realiza dicha tarea. Tampoco hay que olvidar que el atleta está en constante evolución y la técnica cambia durante toda la vida.

Este tipo de entrenamiento será más respetuoso con la variación del movimiento que presenten los atletas, ya que el entrenador buscará la comprensión de las necesidades del deportista para proponer los condicionantes adecuados (Davids y Button, 2000). Esto puede favorecer que las sesiones, especialmente al inicio del aprendizaje, sean menos frustrantes.

Determinados deportes tienen un reglamento que especifica de forma muy concreta la técnica del movimiento. Todos aquellos en los que se valora la "estética" o la forma de ejecución, como son las diversas modalidades gimnásticas, los saltos de trampolín, el patinaje, la natación sincronizada... poseen esta característica. No se podrá dejar total libertad al atleta para que descubra su forma más eficiente para ejecutar una tarea, como podría suceder en un deporte de oposición, pero sí que se pueden buscar condicionantes que ayuden al deportista a ejecutar el movimiento siguiendo las premisas del código de forma más inconsciente. En el inicio del aprendizaje se propondrán repeticiones del movimiento con condicionantes favorecedores, y posteriormente se variarán ciertos aspectos de la técnica para afianzar el aprendizaje. El proceso puede finalizar con una nueva

disminución de las variaciones para favorecer la estabilización de la técnica, tal y como proponen Rein y Simon (2003). Puede ser especialmente interesante modificar las condiciones iniciales o finales del movimiento, ya que esto se produce de forma muy frecuente en los entrenamientos o en la competición involuntariamente. Una vez dominada la técnica, se variarán las situaciones en las que se dé dicha técnica, puesto que, a pesar de que el entorno en esos deportes está muy controlado, en cada competición o entrenamiento se producirán condicionantes diferentes. Estos condicionantes pueden ser simplemente el estado del organismo del atleta, que producirá modificaciones en la ejecución de la técnica, el estado de la superficie en la que se desarrolla cada situación, la perturbación momentánea producida por algún objeto inesperado o la actuación del público... Además, los movimientos suelen estar enlazados, y la modificación de uno producirá la variación en las condiciones iniciales del siguiente.

En nuestra opinión, debido a la consideración sobre el estado inicial del atleta y la estabilidad de los atractores, se requiere más investigación para afirmar que el entrenamiento diferencial o el entrenamiento basado exclusivamente en variaciones es válido para todos los estados del sujeto o todos los niveles de entrenamiento. Probablemente, en la iniciación deportiva puede ser muy interesante aumentar la variedad de los estímulos al principio del aprendizaje para optimizar los sistemas y hacerlos más flexibles y adaptables. Pero para aprender una determinada técnica o movimiento muy concreto puede sernos útil mantener cierta especificidad de la práctica realizando repeticiones de la tarea hasta que se cree un atractor estable en la dirección que pretendemos. Observemos el aprendizaje de los niños y veremos que éstos intentan repetir la tarea hasta que crean un patrón estable (Thelen y Smith, 1998). Estas repeticiones se diseñarán teniendo en cuenta la distribución actual de los atractores y podrá modificarse algún parámetro para que se cree el atractor deseado. Una vez creado este atractor se variarán las situaciones para que el sujeto sea capaz de adaptarse a la infinidad de condicionantes que pueden producirse. Se buscarán formas para perturbar al sujeto mientras realiza la tarea para

disminuir el critical slowing down por si se producen situaciones inesperadas. Así, por ejemplo, el deportista que domina la técnica del bote de balón deberá someterse a un equipo contrario que pretenderá robársela, por lo que deberá ser muy eficaz volviendo al patrón estable del bote después de cualquier perturbación. También para modificar cualquier gesto técnico se deberá perturbar al sistema para modificar la distribución de atractores existente, tanto más cuanto más estables sean éstos. El entrenador deberá considerar los errores como fluctuaciones necesarias para que se produzca cualquier aprendizaje, por lo que en determinadas situaciones se potenciarán con estrategias como la perturbación o la variabilidad. En definitiva, enfatizamos desde aquí la alternancia entre la estabilidad y la inestabilidad, la provocación de fluctuaciones continuas del sistema.

Pero la variabilidad no sólo servirá para mejorar una técnica concreta, sino para modificar estructuras inadecuadas de forma global y desarrollar otras más adecuadas, ya que el entrenamiento no debe orientarse sólo al pulido de secuencias motrices, sino a la optimización de estructuras cognitivas integradas en la globalidad del organismo. El aprendizaje no será el cambio de un atractor en concreto únicamente, sino que siempre se producirá una modificación de la distribución global de los atractores del sistema. Por ello cualquier transferencia de una habilidad que se posee a otra nueva ocurrirá mientras haya correspondencia entre ellas en cuanto a su dinámica coordinativa (Kelso, 2003).

8.4- La transferencia

Uno de los aspectos que preocupan de forma más importante al entrenador es cómo se transfieren mejor las cargas de entrenamiento a la competición, especialmente en el caso del entrenamiento condicional (López et al., 1996; López y Moras, 1997). La escasa documentación al respecto hace que en la mayoría de los casos se utilicen diferentes estrategias sin conocer

exactamente sus mecanismos de actuación. Una de las causas de este desconocimiento es que dichos mecanismos involucran especialmente al SNC, cuyas características constituyen uno de los apartados más desconocidos en el ámbito de la fisiología del ejercicio. Posiblemente por este motivo, y para dar respuesta a estas necesidades de transferencia, algunos técnicos utilizan, de forma más o menos intuitiva, los llamados ejercicios de transferencia. Dicho tipo de ejercicios, que se utilizan fundamentalmente en el entrenamiento de fuerza, pretende trasladar los beneficios conseguidos por un trabajo genérico, como pueden ser los ejercicios con máquinas, a la técnica concreta del deporte. Este tipo de estrategias tiene relación con el modelo cognitivo, que plantea la necesidad de informar al procesador central sobre el modelo o la técnica sobre la cual realizar la transferencia.

La propuesta de la interferencia contextual también se preocupó por el concepto de la transferencia, aunque focalizando su atención en el aprendizaje coordinativo, y sus estudios sugieren que ese tipo de práctica es mejor que la práctica constante para transferir el aprendizaje a una tarea nueva o a una nueva variación de la tarea (Magill y Hall, 1990)

Desde la perspectiva que nos ocupa, no es necesario que informemos adecuadamente al procesador del gesto sobre el que pretendemos que se produzca la transferencia. Las transferencias se realizan en los sistemas dinámicos de forma espontánea, de manera que el sujeto encuentra las respuestas adaptativas más idóneas y genera patrones motores adecuados.

De hecho, el mismo Kelso junto con su colaborador Zanone (2002) nos habla de transferencia en su ya comentado estudio sobre el aprendizaje de una tarea por un sistema y su transferencia espontánea a otro sistema (véase apartado 5.3.2). Se entiende así las transferencias que se dan en el entrenamiento del miembro dominante al no dominante.

Más específicamente en el campo del entrenamiento de la fuerza, Weir et al. (1994) examinan los efectos del entrenamiento de fuerza isométrica unilateral de una pierna sobre la pierna no entrenada. Un grupo de estudio (nueve sujetos) entrenó durante 6 semanas mientras que un grupo control (seis sujetos) no entrenó. Se observó un efecto de transferencia en cuanto a la capacidad de producción de fuerza del miembro no entrenado antes y después de las seis semanas en los mismos ángulos en los que se produjo en el miembro entrenado en el grupo de estudio. Los autores sugirieron como posibles causas la existencia de impulsos motores sobre los músculos del miembro no entrenado, así como el efecto del mantenimiento de la postura mientras se ejecuta el ejercicio con el otro miembro. Esta última causa se pone en duda por la existencia de estudios que muestran el insuficiente nivel de activación para producir adaptaciones que ocurre durante el ejercicio del miembro contralateral. Por otro lado, otros autores han estudiado como en estos casos de transferencia no tiene porqué producirse hipertrofia en ninguno de los dos miembros (Lewis et al., 1984). La explicación que dan Zanone y Kelso (2002) sobre la transferencia no contradice los resultados de este estudio, que se puede considerar en cierta forma un estudio sobre el aprendizaje de una tarea. El patrón de producción de la fuerza se ha aprendido de forma independiente del sistema ejecutor, lo que significará que hay una equivalencia motriz. Se ha integrado la información de diferentes fuentes que condicionan el comportamiento.

Bruhn et al. (2004) estudiaron como un entrenamiento sensomotor o propioceptivo podía transferirse a una mejora en el salto y en la fuerza máxima isométrica. Un grupo de once sujetos siguió un programa de cuatro semanas de entrenamiento de fuerza, un grupo de doce sujetos siguió el entrenamiento propioceptivo basado en tareas de equilibrio sobre superficies inestables, y diez sujetos más sirvieron de grupo control. Los resultados mostraron que el entrenamiento propioceptivo mejoró la ejecución de saltos con profundidad y la fuerza isométrica del tren inferior, aunque la mejora fue sólo significativa en el grupo que realizó entrenamientos de fuerza. Heitkamp et al. (2001), en cambio, demostraron que las mejorías en fuerza isométrica

máxima después de un entrenamiento de equilibrio eran similares a las obtenidas mediante un entrenamiento de fuerza. Este tipo de transferencia es distinto a la explicada anteriormente, pero muestra la globalidad de las respuestas, así como la posibilidad de entrenar diferentes capacidades simultáneamente.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con la interferencia contextual, probablemente el entrenamiento diferencial también será más efectivo que el basado en la repetición de ejercicios para que se produzca una “transferencia” a nuevas tareas o acciones motrices. No obstante, no existen investigaciones sobre esta cuestión, por lo que es una suposición que se debería corroborar.

8.5- Facilitación del aprendizaje mediante la adaptación del medio o entorno o mediante la modificación de los parámetros de control.

Para facilitar el aprendizaje de una nueva técnica se puede favorecer el ciclo percepción-acción modificando el entorno en la dirección que deseamos que se dirija el movimiento final. Un ejemplo de esta modificación es la que llevó a cabo Meschner (2004a), tal y como se ha explicado en el apartado 5.3.2. La visión del movimiento de unas banderas facilitó el aprendizaje de una tarea bimanual. Este autor explica estos resultados basándose en su perspectiva psicológica, pero llega a conclusiones similares en cuanto a la práctica, y propone la adaptación del entorno en lugar de las clásicas repeticiones. Con relación a esta adaptación, Mechsner (2004b) destaca que la información tiene que ser necesariamente percibida por el sujeto, por lo que el diseño de una tarea adecuada es fundamental. Para adaptar el entorno podemos utilizar marcas en el suelo o en el espacio que ayuden al sistema a acoplarse a ellas o que le den una referencia. Esto sería útil para tareas relacionadas con el salto o en las que la percepción espacial juegue

un papel importante, como es el caso de muchas tareas gimnásticas. En las modalidades gimnásticas se denomina a este tipo de facilitación ayudas referenciales (Vernetta et al., 2000), y se consideran muy importantes debido a los problemas de orientación espacial que generalmente tienen los principiantes al ejecutar aquellas tareas en las que se adoptan posiciones invertidas del cuerpo. Algunos ejemplos de estas ayudas pueden ser marcar la distancia o la posición de la parte del cuerpo que sirve de apoyo o poner una cuerda o similar para que los gimnastas salten por encima o eleven la cadera en algún elemento con fase de vuelo.

Vernetta et al. (2000) también señalan que estas ayudas pueden ser acústicas, marcando el ritmo del movimiento en todo su recorrido o en momentos fundamentales de la tarea. Las señales acústicas son otro ejemplo de modificación del medio que puede ayudar al sistema a que se sincronice con ellas para moverse en una secuencia temporal determinada o al ritmo deseado, tal y como sucede cuando se entrena con música.

Wulf y Prinz (2001) muestran como las instrucciones relacionadas con el efecto del movimiento sobre el medio son más efectivas que las que se refieren al movimiento en sí, lo que refuerza la metodología que aquí proponemos. No obstante, también consideramos importante las instrucciones referidas a la vivencia y sensaciones del movimiento, ya que no hay que olvidar que estas sensaciones corresponderán a la información que nos da la percepción propioceptiva. Sería lo que comúnmente denominamos un trabajo para aumentar la conciencia corporal, que ayudará a que la información propioceptiva sea significativa para el sujeto que la lleva a cabo. Este trabajo ayudará además a que el deportista adecue el entrenamiento a sus necesidades y ejecute cada tarea de forma más respetuosa con su propio organismo

La modificación de los parámetros de control o del entorno también facilitará la desestabilización de la distribución de los atractores existente y que el comportamiento emerja sin la necesidad de instrucciones precisas creando

el atractor en la dirección deseada. Podemos buscar así nuevas posiciones para ejecutar las tareas, utilizar instrumentos o realizar los entrenamientos en medios o superficies distintas, como el agua o la arena. En el apartado 5.3.3. ya se explicaron los estudios en los que diferentes niños aprendían a caminar con la ayuda de cintas rodantes y otros instrumentos. Otro ejemplo de este tipo de facilitación puede ser la disminución de la velocidad de ejecución de un movimiento, tal y como se hacía para aprender una nueva relación fase entre dos miembros en los estudios sobre aprendizaje motor (véase apartado 5.3.2). Esta propuesta puede aplicarse en aquellos deportes en los que haya que aprender secuencias complicadas de movimientos al inicio del proceso de aprendizaje. Otro ejemplo claro de esta estrategia es el que puede observarse en el deporte que posteriormente se tatará en la parte empírica: la gimnasia aeróbica. Cuando el atleta domina una determinada coreografía a la velocidad de competición tiene grandes dificultades en cambiar la posición de alguna parte del cuerpo en un momento de esa coreografía. Prácticamente le será imposible conseguirlo si pretende cambiar esa posición entrenando a la velocidad de competición y repitiendo una y otra vez el paso con sus movimientos precedentes y posteriores. En vez de ello, deberá ralentizar sus movimientos y entrenar a una velocidad muy inferior hasta conseguir que la nueva posición atraiga al sistema. Es decir, se modificará el parámetro de control de la misma forma en la que se aprendía cualquier movimiento cíclico con una determinada relación de fase. En ese caso, el atractor era muy estable, pero puede suceder que el movimiento observado no sea estable y que por tanto el proceso de aprendizaje requiera técnicas distintas, ya que no hará falta desestabilizar al atractor existente. Para analizar la estabilidad del atractor, proponemos el análisis de las fluctuaciones que se dan durante la ejecución del movimiento, tal y como explicaremos en la parte empírica.

Otro ejemplo de modificación de los parámetros de control es la disminución de la carga o del peso que debe soportar el sujeto para realizar aquellas acciones que requieren de una gran aplicación de fuerza, o aumentar la estabilidad del sujeto mediante alguna ayuda externa. En la parte empírica

se propone una tarea que puede facilitarse mediante esta ayuda: las flexiones de brazos de tres apoyos (una mano y dos pies). Para su aprendizaje, es efectivo ayudar al gimnasta sujetando el hombro libre, de forma que se aumenta su estabilización y disminuye el peso que debe superar. En el entrenamiento de todas las modalidades gimnásticas es frecuente modificar estos parámetros, utilizando por ejemplo la barra de ballet para realizar ejercicios en los que la base de sustentación es muy pequeña (equilibrios o giros).

El trabajo con compañeros puede facilitar también el aprendizaje. Las posiciones que éstos adopten, los lugares que ocupen o la relación que tengan con el atleta condicionarán su aprendizaje y su adaptación. Consideramos interesante introducir aquí el ejemplo de una práctica corporal basada eminentemente en la relación y cooperación con otra persona y que para su aprendizaje y entrenamiento se utiliza una metodología que encaja a la perfección con todo lo que aquí se propone. Esto sucede en la danza contact-improvisation, modalidad basada en la comunicación corporal entre dos o varios bailarines que danzan de forma improvisada dialogando entre ellos a través del contacto corporal. Su aprendizaje se basa principalmente en la exploración y experimentación sobre lo que sucede cuando contactamos corporalmente con otro compañero, cuando compartimos nuestro peso, cuando recibimos el peso de nuestro compañero, cuando le damos el nuestro o cuando seguimos el movimiento de otro o siguen el nuestro. El profesor no suele enseñar técnicas específicas y da muy pocas instrucciones o feedback, tal y como sucede en el proceso de enseñanza-aprendizaje de otras modalidades de expresión corporal, pero guía y facilita el camino de la exploración. Es sorprendente como los alumnos, muchas veces sin una formación corporal específica, aprenden a realizar difíciles acrobacias sin instrucciones precisas, y cómo adoptan las posturas corporales más ergonómicas gracias a la información sensorial que obtienen por el contacto con el compañero o con el suelo. Esta falta de instrucción o de modelo a seguir, así como la estimulación cinestésica y del tacto constante, consigue que el alumno esté completamente atento a sus

sensaciones y a lo que recibe del medio, aislándose completamente de todo aquello que no sea su danza improvisada. Ambos sujetos formarán un nuevo sistema autoorganizado.

III- PARTE EMPÍRICA

1- Introducción

En la parte empírica se exponen dos estudios: “El entrenamiento diferencial en la gimnasia aeróbica” y “Fluctuaciones y estabilidad en el salto vertical”.

El primer estudio que se lleva a cabo consiste en la aplicación de la propuesta descrita en la parte teórica por W. Schöllhorn de entrenamiento, el aprendizaje o entrenamiento diferencial, en gimnastas de alto nivel de gimnasia aeróbica. Estará centrado por tanto en el estudio de una aplicación fundamentada en los conceptos y principios teóricos de la teoría de los sistemas dinámicos.

A raíz de una encuesta que llevamos a cabo con 44 gimnastas de nivel nacional de gimnasia aeróbica, observamos que el entrenamiento clásico basado en repeticiones de un mismo ejercicio y la reproducción de un modelo ideal era el predominante en esta modalidad. Por este motivo decidimos comparar los efectos de este entrenamiento más tradicional con los del entrenamiento diferencial mediante un estudio de casos. Para evaluar estos dos métodos de entrenamiento analizamos la interacción de la carga con el rendimiento mediante dos herramientas de análisis, una basada esencialmente en técnicas lineales, las correlaciones cruzadas, y una en no lineales, el PerPot metamodel. A su vez, también comparamos los resultados si medíamos la carga utilizando una forma clásica de cuantificación que tenía en cuenta el volumen y la intensidad y una forma más cualitativa que tenía en cuenta el número de variaciones propuesto. Finalmente, se compararon los resultados obtenidos entre la carga aplicada al tren superior y la carga aplicada al tren inferior con su rendimiento correspondiente. Consideramos que el estudio de casos era el más adecuado para la realización de un análisis tan exhaustivo que tuviera en cuenta tantas variables. Este tipo de estudios ofrece la posibilidad de informar ampliamente sobre las respuestas individuales de los sujetos y son además coherentes con los principios derivados de la TSD, como la

individualidad, la dependencia sensible a las condiciones iniciales o la constante interacción entre el sujeto y el medio, tal y como ya se ha comentado en el apartado 3.2 de la parte teórica. Además, los estudios de casos se han utilizado tradicionalmente como fuente de nuevas ideas e hipótesis sobre el comportamiento, sus causas y sobre los procesos de cambio (Smith, R. 1988), lo que encajaba con los objetivos de esta tesis. Para aumentar la generalización del estudio, se realizó la replicación simultánea con tres sujetos (Barlow y Hersen, 1984), aunque como se verá a continuación sólo se tienen en cuenta los resultados de dos de ellos.

El hecho de utilizar gimnastas de alto nivel era muy interesante de cara a tener sujetos motivados para mejorar por razones ajenas al estudio, así como para tener la posibilidad de controlar diariamente el seguimiento de los entrenamientos y su evolución. No obstante, los tests y el volumen de entrenamiento siempre debían respetar las necesidades competitivas de las gimnastas, así como los periodos de entrenamiento, supeditados al calendario competitivo.

Este estudio mostrará la efectividad del entrenamiento diferencial en la gimnasia aeróbica, pero de él se extrajo otra conclusión importante: la utilización de parámetros discretos para evaluar tiene limitaciones para demostrar la eficacia de métodos de entrenamiento globales y basados en la concepción del ser humano como un sistema dinámico complejo. A raíz de esta conclusión, se planteó el segundo estudio, en el que se pretendió demostrar la organización dinámica y no lineal de los sujetos al ejecutar acciones motrices deportivas. A su vez, se pretendía encontrar una variable que fuera cuantificable y pudiese mostrar la evolución global del sujeto.

Esta organización dinámica y el comportamiento no lineal de los seres vivos en movimiento han sido claramente mostrados en los movimientos cíclicos, así como en la ejecución de determinadas tareas discretas, tal y como ha sido ampliamente descrito en la parte teórica. En cambio, hay pocos estudios que tengan por objeto una acción motriz claramente deportiva.

Los tests del primer estudio se basaban en este tipo de acciones, concretamente en la ejecución de saltos y flexiones de un brazo. Para el segundo estudio, se seleccionó una de ellas, el salto, para investigar el comportamiento de los sujetos mientras la ejecutan. El salto, concretamente el vertical, es una acción que se utiliza en prácticamente todos los deportes de equipo y en muchos individuales. La justificación de entrenar el salto vertical siguiendo los principios del comportamiento no lineal de los seres vivos pasa por considerar que dichos seres se organizan siguiendo estos principios para moverse al ejecutar los saltos. Para comprobar que realmente este tipo de organización se da en los sujetos mientras ejecutan cualquier salto vertical estudiamos con la ayuda de una plataforma de fuerzas cómo eran las series temporales de la aplicación de la fuerza en la superficie de apoyo durante el tiempo de contacto previo al salto. Esta fase ha sido ampliamente estudiada por su influencia determinante en el recorrido del centro de gravedad del sujeto durante la fase aérea, pero generalmente la investigación se ha centrado en parámetros discretos extraídos del componente vertical (F_z) de la fuerza. Nosotros nos centramos en la forma de las series temporales de la fuerza en sus tres componentes (F_x , F_y y F_z) para encontrar señales de no-linealidad, ya que consideramos que éstas podían constituir una variable dependiente que describiera suficientemente el comportamiento del sistema.

Una vez identificada la variable dependiente, nos centramos en encontrar un parámetro de control que provocara algún cambio en el comportamiento de esta variable y que fuera susceptible de ser modificado experimentalmente sin poner en peligro la integridad del sujeto. Fruto de esta manipulación deberían de aparecer señales de no-linealidad, como la identificación de puntos de transición o la aparición de fenómenos como las fluctuaciones críticas.

Las fluctuaciones sólo podrían ser observadas si se tenía en cuenta toda la serie temporal de esta fase del salto, y quedarían obviadas si nos centrábamos únicamente en buscar valores discretos en la fuerza vertical

como se había hecho hasta el momento. Las fuerzas horizontales y el comportamiento del organismo durante toda la fase nos podían dar mucha información sobre el estado del sujeto y sobre la forma de reaccionar ante diferentes estímulos. Las fluctuaciones y la variabilidad podían constituir variables significativas a la hora de analizar los saltos en los deportistas. Hasta el momento, las fluctuaciones y la variabilidad de las series temporales se habían considerado ruido de la señal y se intentaban eliminar. Por su parte, las fuerzas horizontales no se estudiaban porque eran muy variables, perdiendo por tanto la posibilidad de detectar el fenómeno de la estabilidad y el comportamiento global y no lineal del organismo. La perspectiva de la teoría de los sistemas dinámicos ha permitido observar como la variabilidad puede ser funcional y signo de buen funcionamiento del organismo (Goldberger et al., 1990; Hamill et al., 1999; Newell et al., 1993; Van Emmerik y Wagenaar, 1996) y se ha empezado a considerar esta variabilidad como un nuevo parámetro de análisis. Para poder detectar la variabilidad y las fluctuaciones se requerirá un análisis más cualitativo que cuantitativo, y analizar la forma de las series temporales en lugar de parámetros discretos concretos, tal y como se muestra en el segundo estudio empírico de esta tesis.

1.1- Objetivos de la parte empírica

Los objetivos de la parte empírica son los siguientes:

- Comparar la eficacia del entrenamiento diferencial con relación al entrenamiento tradicional para mejorar la fuerza aplicada a la gimnasia aeróbica en el tren superior y en el tren inferior.
- Comparar la utilización de dos herramientas de análisis, las correlaciones cruzadas y el PerPot metamodel, y dos formas de cuantificar la carga, una basada en el volumen y la intensidad y otra basada en el número de variaciones de la carga.

- Demostrar la organización dinámica y no lineal del individuo mientras realiza acciones motrices deportivas.
- Identificar una variable cuantificable capaz de valorar la evolución global de la ejecución de acciones motrices deportivas.

2- Estudio 1 – El entrenamiento diferencial en la gimnasia aeróbica

2.1- Introducción

2.1.1- Características de la gimnasia aeróbica

La gimnasia aeróbica es todavía un deporte minoritario introducido en España en el 1991, poco antes de empezar a pertenecer a la Federación Internacional de Gimnasia (FIG) en 1995. Sus orígenes provienen del aeróbic tradicional en la década de los 80', en la que se crearon diferentes estamentos oficiales que empezaron a organizar competiciones. Actualmente, las principales asociaciones o federaciones que realizan competiciones internacionales son la FIG y la Federation of International Sports, Aerobics and Fitness (FISAF). No existe un acuerdo en cuanto a las normas de competición entre estas dos, por lo que los países que desean participar en los diferentes torneos, como es el caso de España en los últimos años, deben adaptarse a los diferentes reglamentos.

La gimnasia aeróbica se define como la habilidad para ejecutar complejos movimientos continuos originales del aeróbic tradicional de alta intensidad al ritmo de la música. La rutina de gimnasia aeróbica debe demostrar continuamente movimiento, flexibilidad, fuerza y la utilización de determinados pasos combinados con elementos de dificultad (código de puntuación FIG, 2004). El gimnasta debe mostrar, además de sus cualidades físicas, perfección técnica, expresión y seguridad. Se puede realizar de forma individual o colectiva (parejas, tríos o grupos).

En el código FIG los elementos de dificultad se dividen en diversas categorías o grupos de dificultades que se denominan de la siguiente manera:

- Grupo A: Fuerza dinámica. Flexiones de brazos, caídas libres, círculos de piernas y cortadas
- Grupo B: Fuerza estática. Escuadras y planchas
- Grupo C: Saltos
- Grupo D: Flexibilidad y equilibrio

Con estas dificultades se pretende mostrar la fuerza y flexibilidad del competidor, para lo que se especifica la necesidad de ejecutar elementos en los que se precisen estas dos capacidades tanto en el tren superior, como en el inferior, y del lado derecho e izquierdo.

Tanto los patrones de movimiento aeróbico como los elementos de dificultad o enlace se deberán ejecutar con una correcta postura y alineación corporal, que será la entendida como tal en la danza o en las otras modalidades gimnásticas.

La duración de las rutinas debe ser de 1'45" (+/- 5"), excepto en el reglamento de FISAF que se alarga hasta 2 minutos, y se debe mantener una alta intensidad de ejecución a lo largo de todo el ejercicio.

El gimnasta debe mostrar estas cualidades físicas con una adecuada presentación. Ésta se basa en la muestra de movimientos limpios, ejecutados con energía, entusiasmo, dinamismo, seguridad y con expresiones faciales genuinas y naturales (código de puntuación FIG, 2004). También será importante la sincronización con los compañeros o con la música, representada por el "timing" (los competidores deben moverse a

tiempo con la música y seguir las frases musicales), y por la adecuación del movimiento y expresión al estilo o carácter de la música.

En cuanto a las necesidades de los practicantes, no existe prácticamente bibliografía sobre este deporte, pero se han empezado a realizar estudios centrados en aspectos fisiológicos principalmente enfocados a encontrar el perfil de este tipo de deportistas.

En el estudio realizado por Riba et al. (1997, datos no publicados) se concluye que el factor fisiológico más determinante de este deporte, por encima de parámetros de orden metabólico, es la fuerza. También López, Vernetta y de la Cruz (2002) encuentran exigencias metabólicas más bajas que en otras pruebas de similar duración, aunque le dan una importancia clave a la resistencia anaeróbica específica y no descartan la posibilidad de la influencia del $\dot{V}O_2\text{max}$ en el rendimiento. Estos autores dan un papel primordial a la fuerza relativa aplicada a la técnica y a los factores neuromusculares debido a las grandes exigencias de salto. Estas conclusiones también se refuerzan por el estudio de Torrents et al. (1999), que parece comprobar la importancia de la fuerza aplicada al salto en la gimnasia aeróbica, especialmente en sus manifestaciones de fuerza elástico-explosiva y de relación fuerza-velocidad, y de la fuerza máxima relativa del tren superior aplicada a las flexiones.

Otras capacidades físicas básicas menos estudiadas pero que evidencian su participación en elementos característicos son la flexibilidad (especialmente del tren inferior) y elasticidad (para la realización de kicks, caídas en espagat o frontal, saltos...), y la velocidad.

López et al. (2002) destacan también la necesidad de una óptima relación entre las cualidades funcionales y las características morfológicas del individuo, del mismo modo que Torrents et al. (1999) defienden el desarrollo de elevados índices de fuerza explosiva y máxima con relación a la masa corporal.

Para finalizar, podemos decir que para una óptima ejecución de una rutina de gimnasia aeróbica se precisa la interacción de multitud de cualidades y la capacidad de adaptarse muy rápidamente a cualquier variación de la rutina durante la competición debido a la alta velocidad a la que se ejecutan los ejercicios. También se sugiere que la capacidad física más determinante es la fuerza, concretamente la fuerza elástico-explosiva aplicada al salto y la fuerza máxima relativa aplicada a las flexiones. Debido a estas conclusiones, se puede predecir que el entrenamiento diferencial puede ser muy beneficioso para optimizar las capacidades del deportista, y se decide aplicar este entrenamiento para la optimización de la fuerza del deportista aplicada a los ejercicios determinantes del deporte: saltos elástico-explosivos y flexiones de tres apoyos.

2.1.2- Entrenamiento de la gimnasia aeróbica

Habitualmente, para la mejora de la ejecución de los ejercicios, los entrenadores de gimnasia aeróbica españoles utilizan métodos de entrenamiento basados en la repetición pretendiendo conseguir la reproducción de lo que se considera la técnica correcta. Ésta era no obstante una suposición que debía corroborarse, por lo que se pasó una encuesta a los participantes en el Campeonato de España organizado por la RFEG (Real Federación Española de Gimnasia) celebrado los días 15 y 16 de abril del 2000 en Palma de Mallorca (Torrents y Balagué, 2001b). Esta encuesta se pasó a los gimnastas y no a los entrenadores para tener información directa sobre lo que se estaba llevando a cabo, y no sobre la planificación teórica del entrenamiento. Se evaluaron un total de 44 gimnastas.

De los resultados que se obtuvieron, podemos extraer información relevante para este estudio:

- El 95,3% de la muestra realizaban entrenamientos de fuerza.

- Los competidores repartían sus entrenamientos de fuerza entre sesiones en la sala de musculación, sesiones realizando ejercicios con el propio peso o con aparatos de gimnasia, y sesiones realizando las dificultades de la coreografía.
- Todos los competidores que entrenaban en la sala de musculación seguían un programa preestablecido, que se modificaba en periodos de 3 a 8 semanas. No obstante, había un 20 % que lo modificaba cada más de 8 semanas o que no lo habían modificado en toda la temporada. Se obtuvieron resultados similares con los que realizaban entrenamientos con los aparatos de gimnasia o con el propio peso (90,9 %).
- El 95,5 % de los competidores repetían siempre o casi siempre los ejercicios dentro de una misma sesión. Sólo un competidor lo hacía a veces y uno no lo había hecho nunca. El 79,1 % repetía siempre o casi siempre los mismos ejercicios en diferentes sesiones. El resto, excepto un caso que no los repetía casi nunca, los repetían a veces. No había ningún gimnasta que no repitiera nunca los ejercicios en diferentes sesiones.
- El 90,9 % entrenaba con compañeros, y el 47,5 % de éstos entrenaban exactamente igual que los compañeros siempre o habitualmente. El 45 % entrenaban igual a veces y hubo 3 casos que no entrenaban exactamente igual que los compañeros casi nunca o nunca.

Con los resultados de esta encuesta se confirmó así la hipótesis de la predominancia de uso de metodologías basadas en la repetición de los ejercicios. La única posibilidad de que esto no quiera decir que se entrena con una metodología basada en el intento de reproducir un modelo externo sería que el entrenador hubiera encontrado el ejercicio ideal para cada sujeto. Los resultados dan a entender que esta no es la justificación, ya que

los que entrenan con compañeros hacen muchas veces lo mismo que ellos, y cuando esto no es así sólo varía una o dos características de los ejercicios, mostrando la poca individualización de los programas utilizados.

Gutiérrez (2002) también considera que el entrenamiento de la gimnasia aeróbica se caracteriza por un planteamiento eminentemente tradicional, basado en progresiones analíticas. Esta autora propone un entrenamiento más global mediante mini-circuitos, con el que consigue mejores resultados que con el entrenamiento tradicional. Su propuesta se basa en un modelo cognitivo, en el que da al feedback visual y a la reproducción una importancia clave. Sin embargo, la metodología de entrenamiento basada en mini-circuitos, comparándola con la tradicional, es más próxima al entrenamiento diferencial por la variedad de tareas que propone y por la forma en que las relaciona.

2.1.3- Aplicación del entrenamiento diferencial en la gimnasia aeróbica

Tal y como ya se ha explicado anteriormente, la gimnasia aeróbica consta de multitud de elementos técnicos que deben ejecutarse de forma fluida y a gran velocidad. La evolución del propio deporte exige la constante inclusión de dificultades de mayor nivel. El entrenamiento diferencial ofrece una nueva forma de plantear los entrenamientos mucho más creativa y adaptada a las necesidades individuales de nuestros deportistas. Los resultados de la encuesta descrita muestran como los entrenadores utilizan la repetición de ejercicios analíticos como medio más importante para mejorar el rendimiento, sin proveer al atleta de un amplio espectro de situaciones que le permita generar cambios en la coordinación, modificar la dinámica intrínseca del sistema y proveer de un nuevo grupo de experiencias que le lleve al descubrimiento de la respuesta final. Este planteamiento encuentra también soporte en el hecho de que la gimnasia aeróbica es una actividad sin oposición y realizada en un medio considerado como estable, lo que

refuerza todavía más a los entrenadores para utilizar una metodología tradicional.

Las variaciones que propone el entrenamiento diferencial no son arbitrarias, sino que ciertos elementos de la técnica de aprendizaje deben incluirse en la práctica. En este caso, el código especifica de forma clara cómo se debe realizar cada dificultad. De hecho, en un deporte muy próximo al aquí propuesto, la gimnástica artística, se propone un entrenamiento para mejorar la fuerza muchas veces similar a lo que propugna el entrenamiento diferencial por la multitud de ejercicios y variaciones que se realizan sobre los aparatos. Pocos gimnastas basan únicamente su entrenamiento en las repeticiones clásicas que se observan en cualquier sala de musculación o en la preparación física de la mayoría de deportes, entre los que también se incluye la gimnasia aeróbica. Se suelen utilizar ejercicios con el propio peso corporal y con la ayuda de aparatos que obligan al atleta a encontrar la mejor forma de ejecutar ese ejercicio favoreciendo la individualización de las respuestas. Los resultados de estos entrenamientos son evidentes en cuanto a la coordinación y conocimiento corporal que llegan a tener los gimnastas de élite, aunque también en este deporte se utilizan sistemas de entrenamiento basados en la repetición de ejercicios.

Según los resultados de la encuesta explicada en el apartado anterior, las sesiones de entrenamiento de gimnasia aeróbica para mejorar la fuerza suelen dividirse en:

- Ejercicios en la sala de musculación
- Ejercicios con el propio peso corporal y con aparatos gimnásticos
- Repetición de dificultades específicas del deporte

Los tres tipos de sesiones pueden ser modificados siguiendo los principios de la propuesta del entrenamiento diferencial, ya que en ésta, y

concretamente en su aplicación a la mejora de la fuerza, Schöllhorn (2000) propone que las variaciones se centren en:

- Variaciones en las condiciones iniciales y/o finales del movimiento
- Cambio del rango de variables
- Cambios en la secuencia temporal del movimiento con relación a la duración relativa o absoluta y el ritmo

Así, el entrenamiento en la sala de musculación, especialmente si se trabaja con pesos libres, ofrece multitud de posibilidades de variación. Inicialmente, se modificará la angulación y las posiciones de inicio y fin del trabajo (por ejemplo, Press Banca cambiando la posición de la barra con relación al tronco en cada “repetición” de la serie y la separación del agarre entre series). Posteriormente se cambiará además el peso de la carga, la velocidad o el ritmo de ejecución y se realizarán combinaciones. Este tipo de trabajo no permite trabajar con porcentajes de fuerza máxima, ya que nunca podremos hacer un test en el que se realice exactamente el ejercicio con el que se entrenará, por lo que proponemos trabajar siempre con porcentajes aproximados y terminar cada serie en el momento que ya no podamos ejecutarlo como se propone (no poder levantar el peso si se trabaja la hipertrofia y no poder ejecutarlo a la velocidad propuesta si se entrenan aspectos coordinativos).

Con los aparatos o con el propio peso es todavía más fácil modificar constantemente los ejercicios, las posiciones de inicio o de fin, la posición de los segmentos que no ejecutan principalmente el movimiento, el ritmo, la velocidad... Por ejemplo, para entrenar un salto carpado con piernas abiertas se puede modificar el impulso (pies juntos, con salto, con flexión-extensión, desde flexión...), la superficie en la que éste se ejecuta (parquet, trumbling,

colchoneta, quitamiedos, cama elástica...), la posición de los brazos o incluso de los pies durante el salto (flexión dorsal o flexión plantar)...

Las dificultades permiten menos variaciones, pero siempre se puede recurrir a las posiciones de inicio, a las superficies de trabajo, a los movimientos previos o posteriores a la dificultad y sobretodo a la imaginación para enriquecer los entrenamientos, evitar innecesarias sobrecargas de los músculos y articulaciones y disminuir además la fatiga psicológica.

Así, el objetivo de este estudio será comparar la efectividad de un método de entrenamiento basado en la repetición de ejercicios con otro basado en el entrenamiento diferencial para la mejora de elementos específicos de gimnasia aeróbica del tren superior y del tren inferior en los que la fuerza es la capacidad física determinante. A su vez, se pretende contrastar dos tipos de herramientas de análisis, las correlaciones cruzadas y el PerPot metamodel, y dos tipos de cuantificación de la carga, una basada en el cálculo del volumen y la intensidad y otra en el número de variaciones de la carga.

2.2- Material y métodos

2.2.1 - Sujetos

Participaron en el estudio tres atletas de nivel nacional de gimnasia aeróbica, seguidas durante 18 semanas de entrenamiento dentro del periodo preparatorio de la temporada. Cada participante fue informada de los métodos del estudio y dieron su consentimiento para participar. Uno de los sujetos tuvo una lesión ajena a la investigación durante el periodo de estudio, por lo que no se han tenido en cuenta sus resultados.

2.2.2- Material

Para todos los tests se utilizó una plataforma de fuerzas Dynascan-IBV versión 7.0 y se recogieron los datos a una frecuencia de 500 Hz. Se gravó con una cámara de vídeo de 8 mm para analizar cualquier resultado contradictorio.

2.2.3- Periodos de estudio

Las gimnastas entrenaban 3 horas diarias 6 veces por semana y se distribuían las sesiones dedicadas a la fuerza en tres tipos: entrenamientos en la sala de musculación con ejercicios generales, entrenamientos con el propio peso corporal y con aparatos gimnásticos, y entrenamientos de las dificultades específicas. Los ejercicios de cada sesión fueron divididos en un grupo dedicado a la fuerza del tren superior (relacionada con las flexiones) y otro dedicado a la fuerza del tren inferior (relacionada con los saltos).

Para comparar la efectividad de un periodo de entrenamiento tradicional con otro de entrenamiento diferencial se siguió un diseño de estudio longitudinal de casos ABA (A: entrenamiento tradicional; B: entrenamiento diferencial). Los efectos del primer periodo de entrenamiento afectarán en los resultados del segundo, incluso si éstos se proponen con un tiempo de separación entre ambos, ya que las mejoras valoradas no están centradas únicamente en parámetros fisiológicos, sino que también influenciarán enormemente los aspectos coordinativos y del aprendizaje. Por ello se propondrán tests semanales y las herramientas de análisis tendrán en cuenta los posibles retardos en cuanto a la aparición de la respuesta fisiológica al entrenamiento, teniendo en cuenta la interrelación constante que existe entre la carga y el rendimiento.

Se dividieron así las 18 semanas en tres periodos de entrenamiento:

- a) 1er periodo: 5 semanas de entrenamiento basado en la propuesta clásica de entrenamiento de la fuerza realizando repeticiones de cada ejercicio orientadas a lograr la técnica correcta y utilizando los mismos en diferentes sesiones tanto en entrenamientos de fuerza general como específica.
- b) 2º periodo: 8 semanas de entrenamiento siguiendo la propuesta del entrenamiento diferencial realizando constantes variaciones de los ejercicios sin ejecutar repeticiones tal y como se ha descrito previamente.
- c) 3er periodo: 5 semanas de entrenamiento clásico como en el primer periodo.

2.2.4- Protocolo del estudio

Las dos variables que se utilizaron para valorar la efectividad de cada tipo de entrenamiento fueron la carga y el rendimiento. Con el fin de estudiar las interacciones entre ambas variables y determinar la efectividad del uso de variaciones, la carga se valoró de dos formas distintas:

- a) Determinación clásica utilizando la siguiente ecuación que tiene en cuenta el tiempo de ejecución dedicado a cada ejercicio, el número de ejercicios y de “repeticiones” y la intensidad relativa:

$$C = \frac{n \cdot \text{Rep} \cdot \text{Irel}}{t}$$

Ecuación utilizada para determinar la carga (C) de forma clásica teniendo en cuenta el número de series (n), el número de repeticiones o ejercicios variados incluidos en cada serie (Rep), la intensidad relativa de los ejercicios de la serie (Irel), y el tiempo empleado para realizar todas las series (t)

Para determinar la intensidad relativa se utilizaron métodos distintos en función del tipo de sesión. Para las realizadas en la sala de musculación se siguió la propuesta tradicional del porcentaje de la fuerza máxima, valorada mensualmente para cada ejercicio general. Para las sesiones de fuerza específica se confeccionaron unos baremos teniendo en cuenta la opinión de las gimnastas, la entrenadora y otros expertos. Estos baremos aparecen en el anexo 1. Para denominar los valores obtenidos de carga utilizando esta metodología de cuantificación utilizaremos el término “carga cuantitativa”.

- b) Determinación basada en las variaciones, calculada a partir del número de ejercicios diferentes que se realizan cada semana. A esta cuantificación de la carga la denominaremos “carga cualitativa”.

El rendimiento se valoró mediante seis tests consistentes en la ejecución de un elemento de dificultad incluido en el apartado de dificultades del Código Internacional de aeróbic deportivo de la FIG. Concretamente, se realizaron tres que pertenecían al grupo de dificultades del grupo A y tres del grupo C (uno para el primer sujeto y los tres para el otro). En cada sesión de valoración, los sujetos repetían tres veces cada test, y se seleccionaba el mejor resultado de los tres para el posterior análisis.

Los elementos del grupo A (fuerza dinámica) fueron los siguientes:

- a) Flexión de tres apoyos (dos pies y una mano) con el brazo derecho: La posición de los pies y de la mano estaba previamente definida, así como los grados de flexión que debían ejecutar. Se debía realizar a la máxima velocidad posible y no era válida si no se llegaba a la angulación precisada. La mano de apoyo estaba sobre la plataforma de fuerzas y se valoró el tiempo absoluto de ejecución (flexión y extensión del brazo)

(véase fig. 35 y 36). De los tres intentos se seleccionó el que se ejecutó con un tiempo absoluto menor.

- b) Flexión de tres apoyos (dos pies y una mano) con el brazo izquierdo: Se valoró de la misma forma que la anterior (véase fig.37).
- c) Flexión de tres apoyos (dos pies y una mano) dislocada: Este ejercicio consiste en una flexión del brazo de apoyo hasta los 90°, seguida de un apoyo del codo en el suelo del mismo brazo, vuelta a la posición de flexión del brazo, y extensión del brazo (véase fig. 38). Se valoró de la misma forma que las anteriores

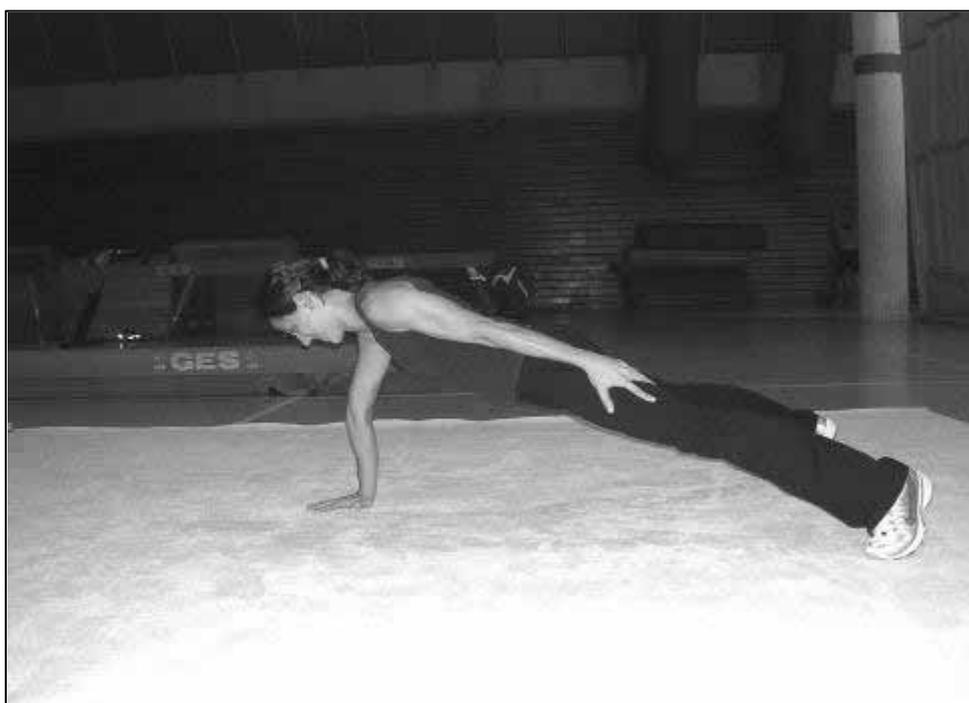


Fig. 35 Posición inicial de los tres tipos de flexiones de brazos.

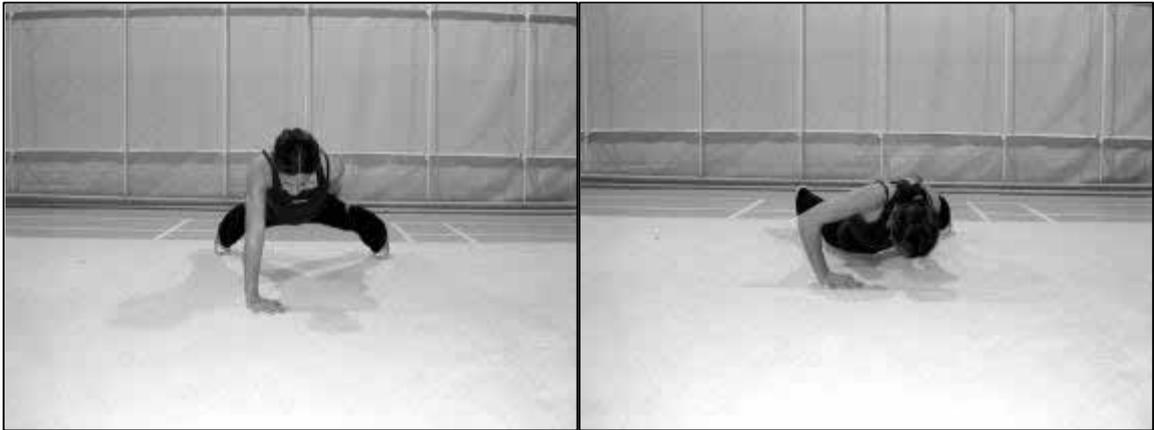


Fig. 36 Flexión de tres apoyos con el brazo derecho



Fig. 37 Posición inicial de la flexión de tres apoyos con el brazo izquierdo

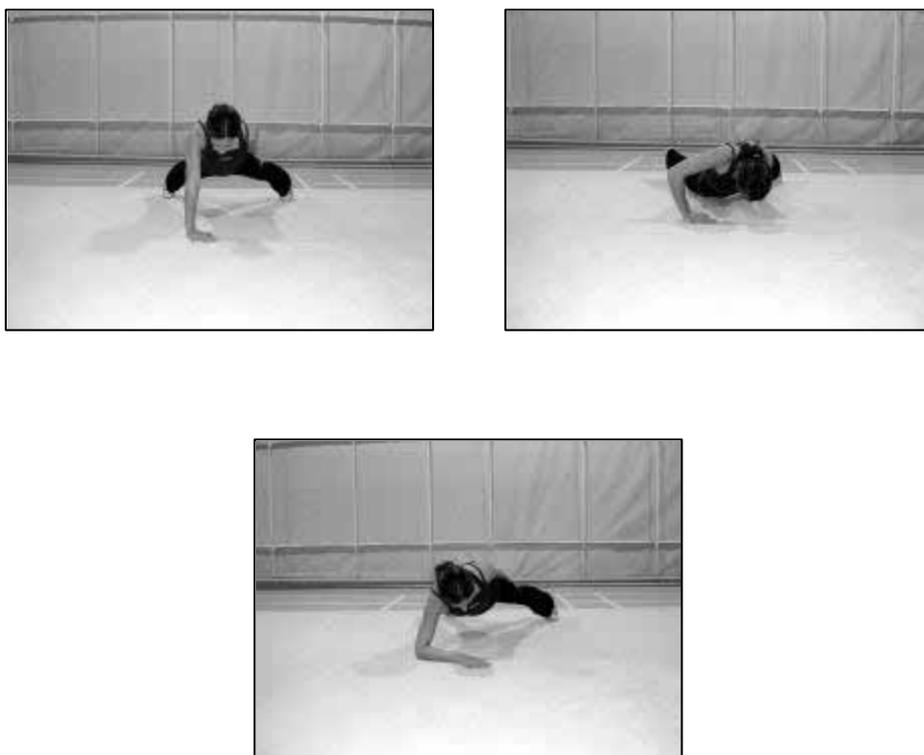


Fig. 38 Flexión de tres apoyos dislocada

Debido a que la disminución en el tiempo de ejecución corresponderá a un aumento en el rendimiento, al resultado obtenido por cada test se le sumó la cifra -4 (no hubo ningún test en el que los sujetos tardasen más de 4 segundos en ejecutar la flexión). De esta forma, los valores más pequeños corresponderán al peor rendimiento y los valores mayores corresponderán al mayor rendimiento.

Los elementos del grupo B (saltos) se ejecutaron con un paso previo. La recepción de este paso debía ser sobre la plataforma de fuerzas con los pies juntos, para saltar posteriormente. Los saltos fueron los siguientes:

- a) Salto en espatat: Salto con piernas abiertas sagitalmente en el que el impulso fue previamente definido, pero no el movimiento de los brazos. Se debía ejecutar alcanzando la máxima altura

posible y con la mínima ejecución técnica especificada en el código para que sea considerada como válida. Si esto no se conseguía el salto no era válido. Se valoró el tiempo de vuelo del salto. De los tres intentos se seleccionó el que se ejecutaba con un tiempo de vuelo mayor. Este salto sirvió de test para ambos sujetos (véase fig. 39).

- b) Salto en carpa: Salto con las piernas abiertas que se valoró de la misma forma que el anterior. Este salto sólo sirvió de test para el sujeto 2 (véase fig. 40).
- c) Salto en carpa con $\frac{1}{2}$ giro: Salto con $\frac{1}{2}$ giro en el que al finalizar el giro se abren las piernas realizando una carpa como en el salto del apartado b. Se valoró de la misma forma que el anterior. Este salto sólo sirvió de test para el sujeto 2.



Fig. 39 Salto en espatat: Fase de contacto con el suelo en el que la gimnasta se impulsa con los pies juntos y fase de vuelo en posición de espatat.

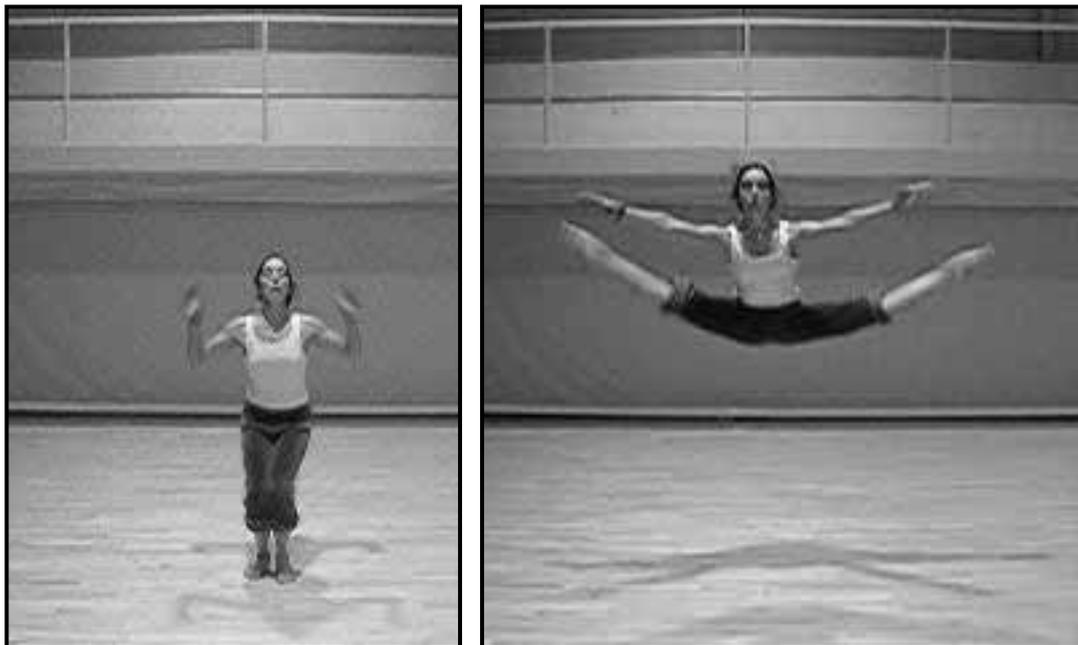


Fig. 40 Salto en carpa: Fase de contacto con el suelo en el que la gimnasta se impulsa con los pies juntos y fase de vuelo en posición de carpa.

Los sujetos conocían perfectamente las características de los elementos, y el respeto por las normas de ejecución, como la alineación corporal, fue exigido en la realización de todos los tests.

Las sesiones de evaluación eran periódicas y se realizaron 5 durante el primer periodo, 8 durante el segundo y 5 durante el tercero.

Cada sesión de evaluación fue precedida de un protocolo de calentamiento que se adjunta en el anexo 1.

2.2.5- Análisis de los datos

Para el análisis de los datos se utilizó el PerPot metamodel (Perl, 2001; 2004b) y se realizaron también correlaciones cruzadas entre las curvas de carga y de rendimiento. Al introducir los datos de carga y rendimiento en el

PerPot metamodel, éstos se normalizan para que el máximo sea 1. Los datos de los potenciales de rendimiento y de fatiga, los gráficos, los perfiles de reserva y los algoritmos obtenidos por el PerPot metamodel fueron analizados con el fin de estudiar los efectos de los diferentes tipos de carga en el rendimiento (véase el apartado 3.3 de la parte teórica).

En el anexo 1, además del protocolo de calentamiento y de los baremos de puntuaciones para valorar la intensidad relativa, se adjunta el protocolo de los tests y varios modelos de fichas utilizados en los entrenamientos.

2.3- Resultados

2.3.1- Resultados de las flexiones de tres apoyos

2.3.1.2- Cuantificación de las variables

Para analizar las interacciones entre la carga y el rendimiento relacionados con la fuerza dinámica se utilizó el PerPot Metamodel, lo que requería cuantificar estas variables tal y como se ha descrito anteriormente. En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos durante los tres periodos de las variables carga cuantitativa, carga cualitativa, y rendimiento valorando el tiempo de ejecución de los tres tipos de flexiones. También se presentan estas mismas variables en forma de gráfico (véase fig. 41).

TABLA 1 Cuantificación de la carga y el rendimiento en cuanto a las flexiones de brazos en ambos sujetos.

Sujeto 1

Semanas	CC	CD	t FD (s)	t FI (s)	t FS (s)
1	2,3325	28	2,4	1,73	3,616
2	1,8858	22	2,386	2,574	3,703
3	3,7967	38	2,094	2,38	2,96
4	4,2013	47	1,773	1,886	2,96
5	0	0	2,06	1,92	3,054
6	2,8675	294	1,92	1,823	3,04
7	2,0409	168	1,886	1,76	2,64
8	3,7522	328	2,06	1,553	2,713
9	1,5634	157	1,58	1,614	2,493
10	2,0265	108	1,574	1,494	2,433
11	1,6637	98	1,507	1,48	2,68
12	0,9086	33	1,56	1,62	2,493
13	0,3783	16	1,36	1,42	2,6
14	1,9892	19	1,433	1,466	2,507
15	1,7376	25	1,367	1,407	2,647
16	1,0225	20	1,56	1,654	2,633
17	1,3373	16	1,393	1,487	2,547
18	1,6107	16	1,553	1,42	2,6

Sujeto 2

Semanas	CC	CD	t FD (s)	t FI (s)	t FS (s)
1	2,2797	28	1,627	1,62	2,426
2	1,7627	23	2,154	2,067	2,733
3	3,9072	32	1,887	1,787	2,64
4	3,9466	42	1,627	1,873	2,827
5	0	0	1,807	1,753	2,654
6	2,8576	187	1,786	1,987	2,7
7	2,21249	142	1,768	1,887	2,67
8	3,9932	283	1,693	1,867	2,553
9	2,9379	156	1,670	1,83	2,519
10	1,2347	36	1,667	1,813	2,486
11	0,2069	30	1,68	1,566	2,55
12	0,6563	52	1,694	1,76	2,62
13	1,5822	96	1,48	1,467	2,727
14	2,198	22	1,426	1,867	2,573
15	1,7768	25	1,66	1,853	2,433
16	1,2454	20	1,593	1,733	2,46
17	1,4714	20	1,507	1,66	2,446
18	1,0594	20	1,494	1,42	2,307

CC: Carga clásica o cuantitativa; CD: Carga en cuanto al número de diferencias o variaciones o cualitativa; t FD (s): Tiempo de ejecución de la flexión con el brazo derecho en segundos; t FI (s): Tiempo de ejecución de la flexión con el brazo izquierdo en segundos; t FS(s): Tiempo de ejecución de la flexión dislocada en segundos.

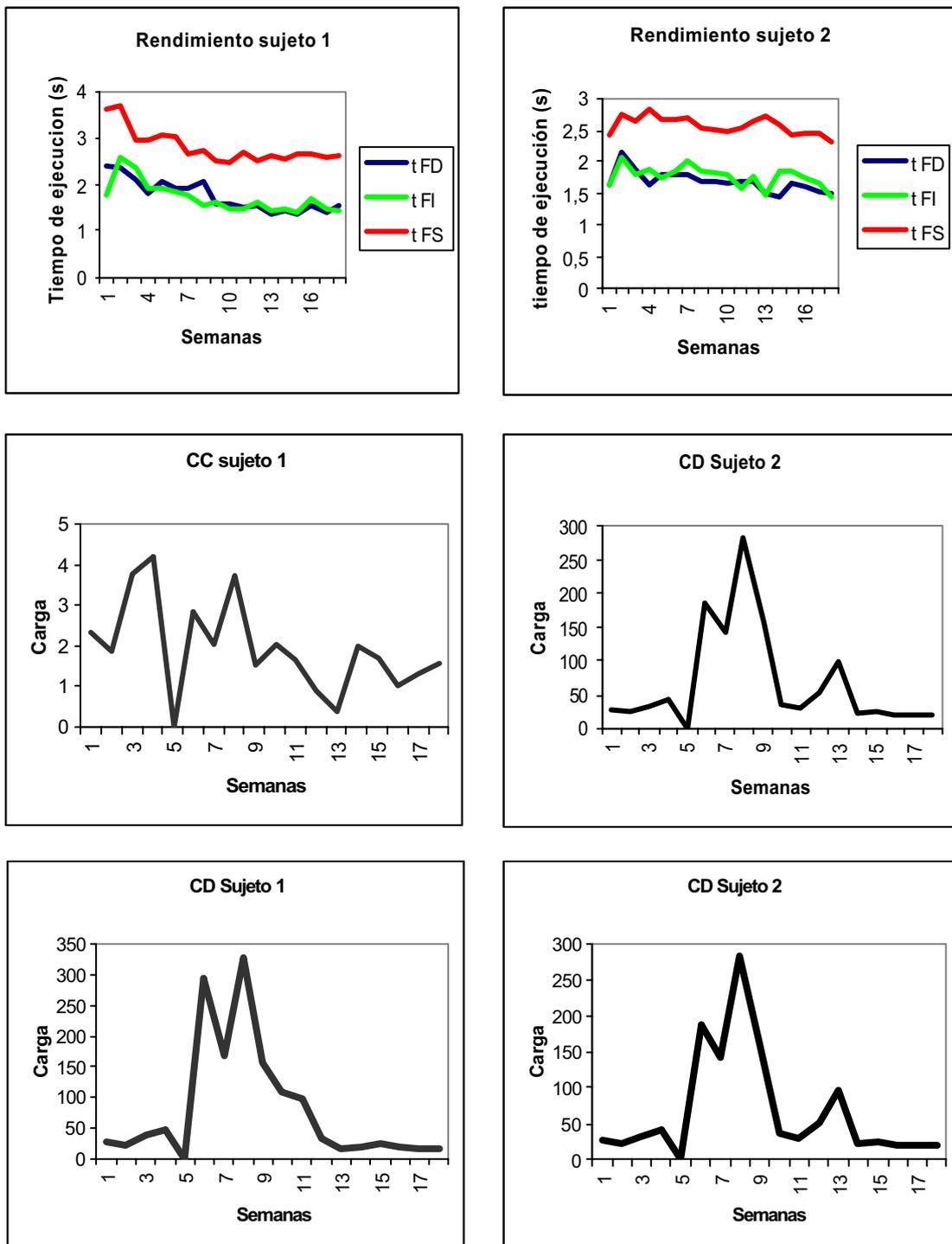


Fig. 41 Cuantificación de la carga y el rendimiento en cuanto a las flexiones de brazos en ambos sujetos. CC: Carga cuantitativa; CD: Carga cualitativa; t FD: Tiempo de ejecución de la flexión con el brazo derecho; t FI: Tiempo de ejecución de la flexión con el brazo izquierdo; t FS: Tiempo de ejecución de la flexión dislocada

En la tabla 2 se muestra la media de toda la carga de cada periodo y la evolución del rendimiento teniendo en cuenta la diferencia entre el primer test y el último de cada periodo. Se observa como teniendo en cuenta el volumen tradicional de carga o carga cuantitativa, este disminuye de 2,44 a 1,9 en el segundo periodo (22%) con relación al primero para el primer sujeto, y de 2,37 a 1,96 (17%) para el segundo sujeto. En el tercer periodo también se disminuye la carga de 1,9 a 1,53 (19%) para el primer sujeto y de 1,96 a 1,55 (21%) en el segundo sujeto. En cambio, teniendo en cuenta el número de ejercicios distintos o la carga cualitativa, la carga aumenta en el segundo periodo de 27 a 150,25 (82%) para el primer sujeto y de 25 a 122,75 (79%) para el segundo. En el tercer periodo disminuye de nuevo de 150,25 a 19,2 (87%) para el primer sujeto y de 122,75 a 21,4 (82%) para el segundo.

En cuanto al rendimiento, el primer sujeto aumenta su rendimiento en el primer periodo en la flexión derecha y en la dislocada en 0,34 y 0,562 s respectivamente, mientras que tarda 0,19 s más en realizar la flexión con el brazo izquierdo. Durante el segundo periodo aumenta su rendimiento en los tres ejercicios en más de 0,4 s, y en el tercer periodo prácticamente se mantiene constante, ya que la flexión con derecha la ejecuta en 0,12 s más, la flexión con izquierda en 0,046 s menos y la flexión dislocada en 0,093 s más. Así, parece que el rendimiento ha mejorado ligeramente en el primer periodo, ha aumentado de forma clara durante el segundo y se ha mantenido constante en el tercero.

El segundo sujeto disminuye su rendimiento en el primer periodo en los tres ejercicios realizándolos en 0,18, 0,133 y 0,228 s más respectivamente. En el segundo periodo aumenta su rendimiento en la flexión con derecha realizándola en 0,306 s menos, y en la flexión con izquierda, realizándola en 0,52 s menos. En la flexión dislocada empeora realizándola en 0,027 s más. Finalmente, en el tercer periodo, mejora en la flexión con izquierda, realizándola en 0,447 s menos, y en la flexión dislocada, realizándola en 0,266 s menos. La flexión con derecha prácticamente se mantiene

constante. Así, también este sujeto mejora más en el segundo periodo, aunque, a diferencia del primer sujeto, continua incrementando su rendimiento en el tercer periodo.

TABLA 2 Media de toda la carga de cada periodo y evolución del rendimiento teniendo en cuenta la diferencia entre el primer test y el último de cada periodo en los dos sujetos en el estudio de las flexiones de tres apoyos

Sujeto 1

Periodos	Media CC	Media CD	ti-tf FD (s)	ti-tf FI (s)	ti-tf FS (s)
1	2,44	27	0,34	-0,19	0,562
2	1,9	150,25	0,56	0,403	0,44
3	1,53	19,2	-0,12	0,046	-0,093

Sujeto 2

Periodos	Media CC	Media CD	ti-tf FD (s)	ti-tf FI (s)	ti-tf FS (s)
1	2,37	25	-0,18	-0,133	-0,228
2	1,96	122,75	0,306	0,52	-0,027
3	1,55	21,4	-0,068	0,447	0,266

CC: Carga clásica o cuantitativa; CD: Carga en cuanto al número de diferencias o variaciones o cualitativa; ti-tf FD (s): Tiempo inicial menos tiempo final en segundos de la ejecución de la flexión con el brazo derecho; ti-tf FI (s): Tiempo inicial menos tiempo final en segundos de la ejecución de la flexión con el brazo izquierdo; ti-tf FS (s): Tiempo inicial menos tiempo final en segundos de la ejecución de la flexión dislocada.

2.3.1.2- Interacción carga-rendimiento de las flexiones de tres apoyos

El análisis anterior no tiene en cuenta la presencia de efectos retardados, por lo que nos parece muy interesante el análisis utilizando el PerPot Metamodel y por correlaciones cruzadas, que pueden tener en cuenta las correlaciones existentes entre la carga y el rendimiento en el mismo momento en que se producen o con periodos de diferencia entre ellos.

El análisis mediante el PerPot Metamodel mostró el gráfico donde aparecen las curvas de rendimiento con los datos originales, la curva de rendimiento optimizada por el programa y la curva de carga. También nos dio la desviación de los datos de rendimiento originales, la desviación de los datos

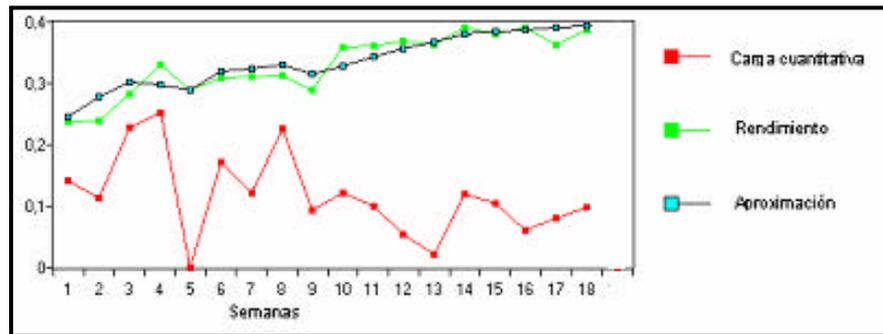
de rendimiento optimizados, la media de la carga, la media del rendimiento, y el valor otorgado al retardo de respuesta y al retardo de estrés.

2.3.1.2.1 - Interacción carga-rendimiento de la flexión con el brazo derecho del sujeto 1

En la figura 42 se muestra la relación descrita por el PerPot metamodel entre la curva de rendimiento de la flexión con el brazo derecho y la curva de carga cuantitativa del tren superior del sujeto 1. En la figura 43 se muestra la misma relación pero utilizando el análisis de correlaciones cruzadas. En los gráficos que muestran los resultados de las correlaciones cruzadas, el retardo 0 representa la correlación entre carga y rendimiento. Los retardos positivos representan la relación entre el rendimiento y la carga impuesta anteriormente, que es la relación que nos interesaba analizar. Los retardos negativos representan la relación entre el rendimiento y la carga futura, pero esta solo puede ser casual, por lo que no lo tuvimos en cuenta.

Se observa como el rendimiento aumenta en los dos primeros periodos, aunque éste correlaciona negativamente con la carga. El PerPot en cambio detecta una relación positiva entre los retardos, siendo mayor el de respuesta que el de estrés.

La figura 44 y la figura 45 muestran las relaciones y análisis anteriores pero con la variable de carga cualitativa.



	Sujeto 1 fd CC
Dev. Ori	5,06
Dev. Opt	0,46
Carga _{media}	1.85
Pef _{media}	2.24
D stress	2.5
D resp	3.0

Fig. 42 Relación entre la curva de rendimiento de la flexión con el brazo derecho y la curva de carga cuantitativa del tren superior del sujeto 1. fd: Flexión con derecha; CC: Carga cuantitativa; Pef: rendimiento; Dev.ori: Desviación de los datos originales; Dev. opt: Desviación de los datos una vez optimizados; Carga media: Media de la carga; Pef. media: Media del rendimiento; D stress: Retardo de estrés; D resp: Retardo de la respuesta

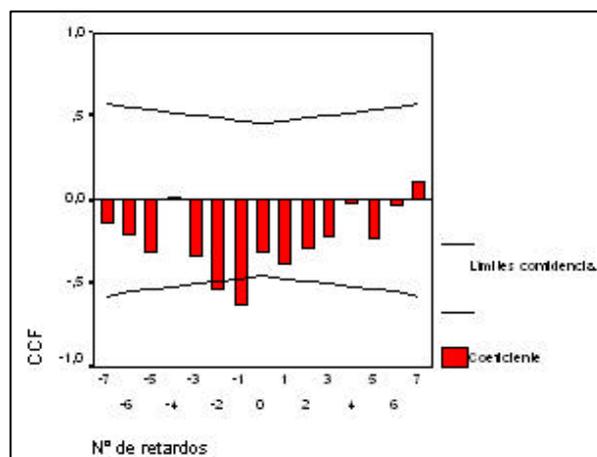
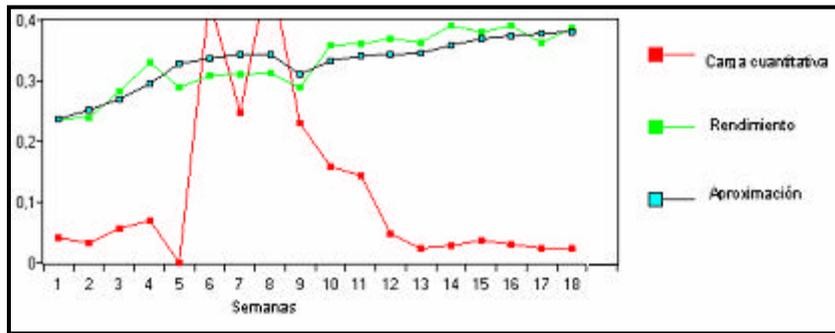


Fig. 43 Correlaciones cruzadas entre la carga cuantitativa y el rendimiento de la flexión con derecha del sujeto 1. CCF: Coeficiente de correlación.



	Sujeto 1 fd CD
Dev. Ori	6.44
Dev. opt	1.64
Carga _{media}	75,42
Pef _{media}	2,24
D stress	7,5
D resp	2.0

Fig. 44 Relación entre la curva de rendimiento de la flexión con derecha y la curva de carga cualitativa del tren superior del sujeto 1. fd: Flexión con derecha; CD: carga en cuanto al número de variaciones o diferencias o cualitativa; Pef: Rendimiento; Dev.ori: Desviación de los datos originales; Dev. opt: Desviación de los datos una vez optimizados; Carga media: Media de la carga; Pef. Media: Media del rendimiento; D stress: Retardo de estrés; D resp: Retardo de la respuesta

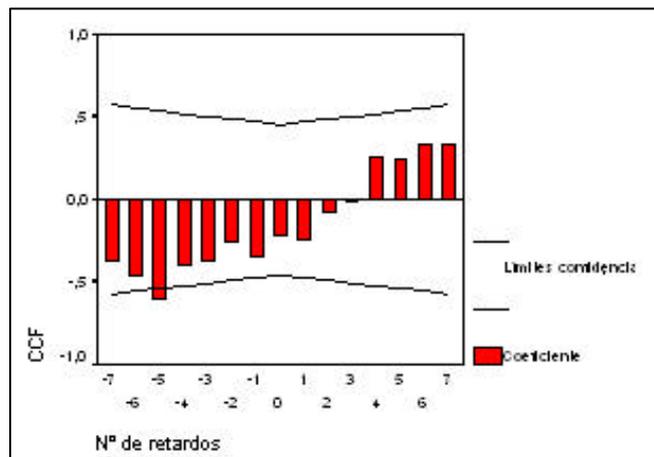


Fig. 45 Correlaciones cruzadas entre el rendimiento y la carga cualitativa del tren superior del sujeto 1. CCF: Coeficiente de correlación

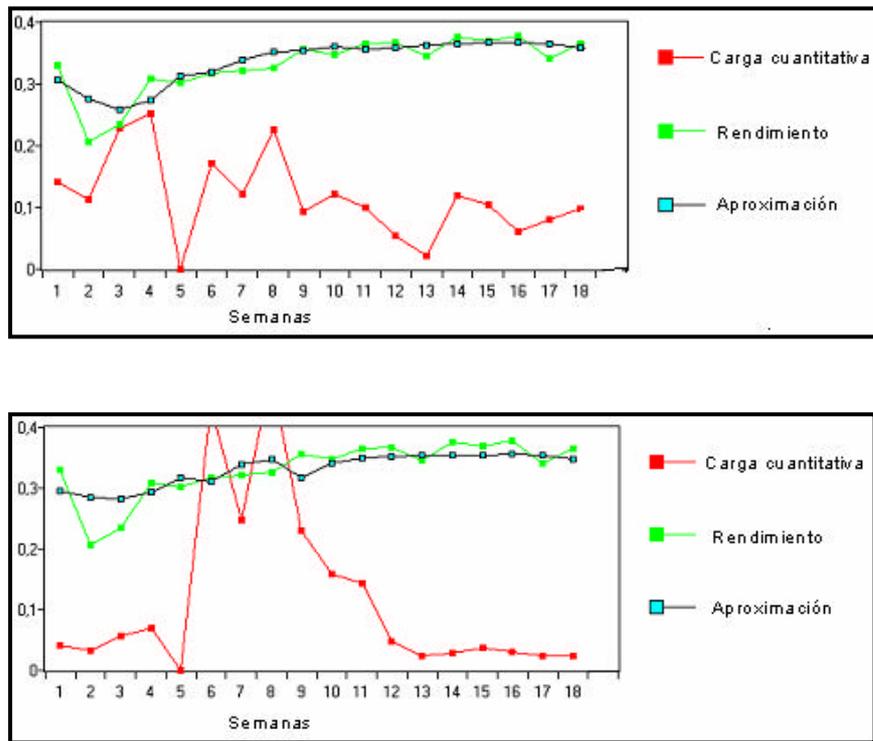
El análisis del PerPot Metamodel mostró una peor relación teniendo en cuenta los retardos característicos para que se produzca una variación del rendimiento en este caso que utilizando los datos de carga cuantitativa. El análisis por correlaciones cruzadas mostró una relación positiva con la carga a partir del periodo tres, cosa que no sucedía en el caso anterior, aunque los resultados no fueron estadísticamente significativos.

También se compararon los resultados de los dos primeros periodos analizados independientemente teniendo en cuenta el rendimiento y la carga cuantitativa. El retardo de estrés fue de 1,5 en el primer periodo y de 3 en el segundo. El retardo de respuesta fue de 1 en el primer periodo y de 4, 5 en el segundo. Así, el retardo de respuesta fue más grande que el de estrés sólo en el segundo periodo.

2.3.1.2.2- Interacción carga-rendimiento de la flexión con el brazo izquierdo del sujeto 1

En el caso de la flexión con izquierda con el sujeto 1, se obtuvieron resultados similares que con la flexión con derecha, y hubo una mejor relación de los retardos con relación a la curva del rendimiento y la carga cuantitativa utilizando el metamodelo que con la curva de carga cualitativa, tal y como se observa en la figura 46.

Al analizar los datos con las correlaciones cruzadas, observamos que también se produjo una correlación positiva a partir del periodo 1 utilizando la carga cualitativa y negativa si se utilizaba el otro tipo de carga, aunque los resultados no fueron estadísticamente significativos, tal y como se observa en la figura 47.



	Sujeto 1 fi CC
Dev. ori	5.18
Dev. opt	2.16
Carga _{media}	1.85
Pef _{media}	2.29
D stress	3.5
D resp	6.0

	Sujeto 1 fi CD
Dev. ori	6.95
Dev. opt	4.06
Carga _{media}	75.42
Pef _{media}	2.29
D stress	9.5
D resp	2.0

Fig. 46 Relación entre la curva de rendimiento de la flexión con izquierda del sujeto 1 y la carga cuantitativa del tren superior (gráfico superior y primera tabla) y con la carga cualitativa (gráfico inferior y segunda tabla). Fi: Flexión con el brazo izquierdo; CC: Carga cuantitativa; CD: Carga cualitativa; Dev.ori: desviación de los datos originales; Dev. opt: desviación de los datos una vez optimizados; Carga media: media de la carga; pef. Media: media del rendimiento; D stress: retardo de estrés; D resp: retardo de la respuesta

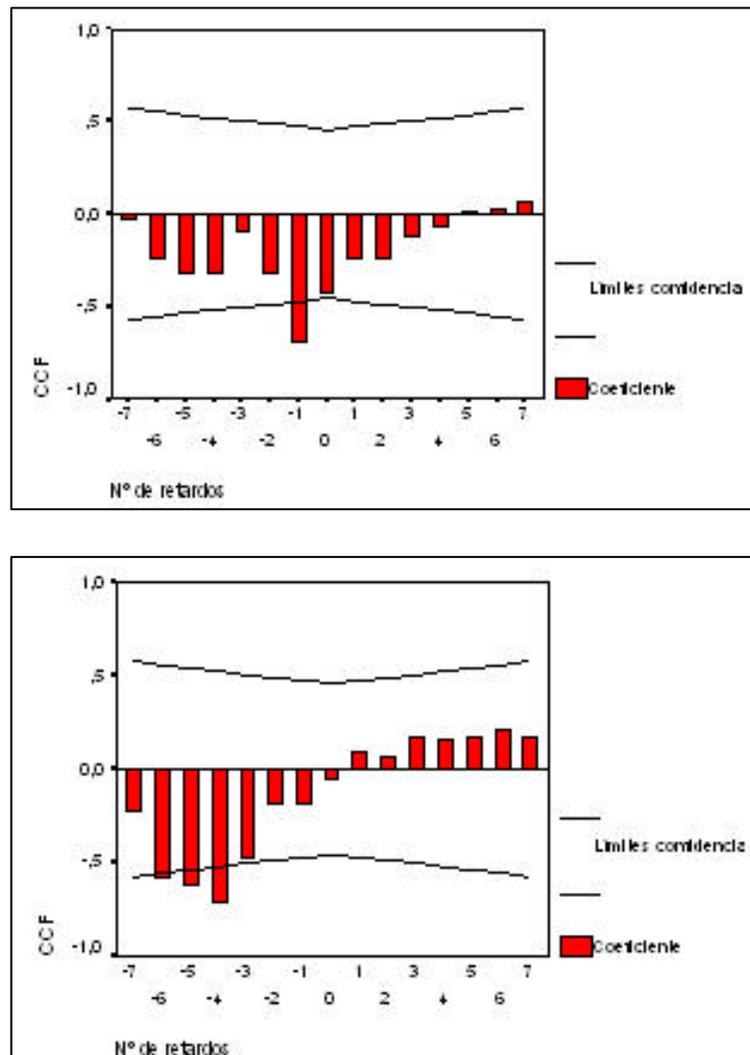
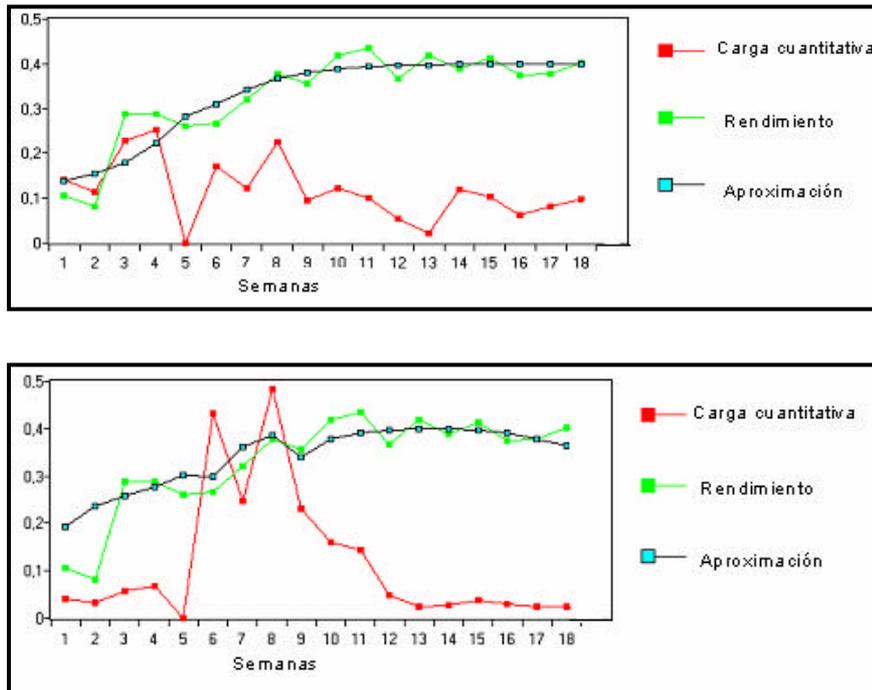


Fig. 47 En el gráfico superior, correlaciones cruzadas entre los datos de rendimiento del sujeto 1 con la flexión con izquierda y la carga cuantitativa. En el gráfico inferior correlaciones cruzadas entre los mismos datos de rendimiento y a carga cualitativa. CCF: Coeficiente de correlación.

2.3.1.2.3- Interacción carga-rendimiento de la flexión dislocada del sujeto 1

El rendimiento de la flexión dislocada sufrió una evolución mayor, probablemente porque partía de una peor ejecución. Sin embargo, los retardos y las correlaciones cruzadas mostraron un comportamiento similar que en las otras dos flexiones, tal y como se observa en la figura 48 y en la figura 49.



	Sujeto 1fs CC
Dev. ori	9.61
Dev. opt	5.64
Carga _{media}	1.85
Pef _{media}	1.20
D stress	4.0
D resp	6.0

	Sujeto 1fs CD
Dev. ori	10.62
Dev. opt	6.12
Carga _{media}	75.42
Pef _{media}	1.2
D stress	7.5
D resp	2.0

Fig. 48 Relación entre el rendimiento del sujeto 1 de la flexión dislocada y la carga cuantitativa (gráfico superior y primera tabla) y relación entre la misma curva de rendimiento y carga cualitativa (gráfico inferior y segunda tabla). Fs: Flexión dislocada; CC: Carga cuantitativa; CD: Carga cualitativa; Dev.ori: Desviación de los datos originales; Dev. Opt: Desviación de los datos una vez optimizados; Carga media: Media de la carga; Pef. media: Media del rendimiento; D stress: retardo de estrés; D resp: retardo de la respuesta

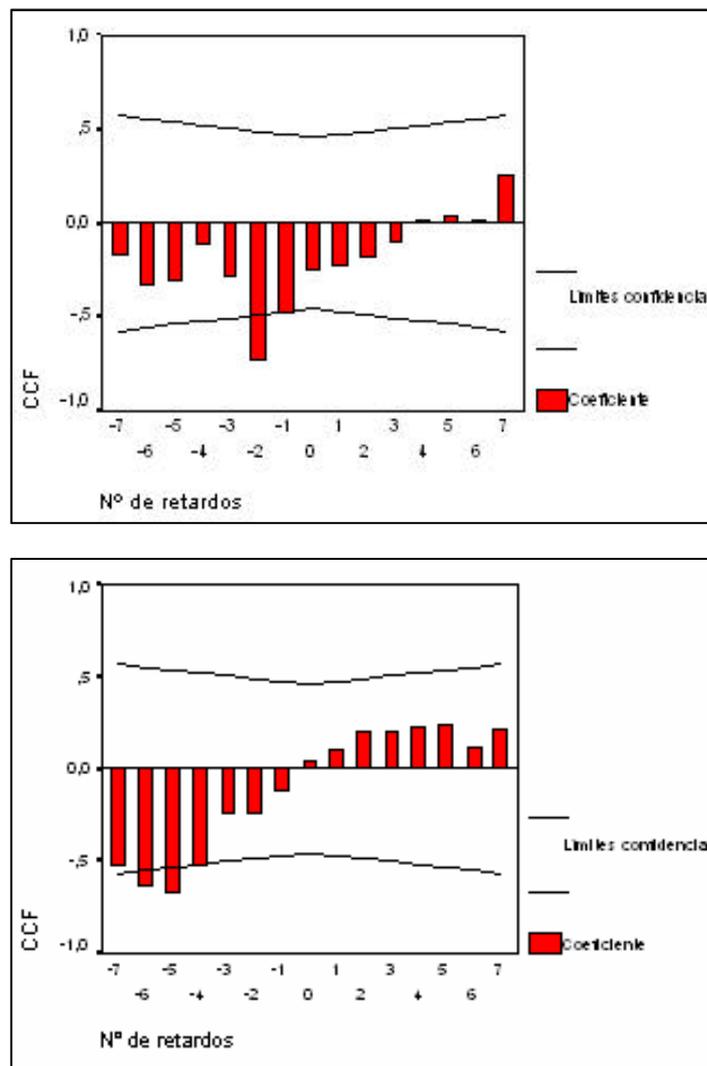


Fig. 49 El gráfico superior muestra las correlaciones cruzadas entre los datos de rendimiento de la flexión dislocada y los datos de carga cuantitativa del sujeto 1. El gráfico inferior ídem pero con la carga cualitativa. CCF: Coeficiente de correlación

El perfil de reserva tuvo un comportamiento similar en los tres ejercicios, y fue positivo cuando se utilizó la carga cuantitativa. En cambio, cuando se utilizó la cualitativa se observó un “overflow”, es decir, se detectó el peligro de caer en sobreentrenamiento. Probablemente por este motivo, el metamodelo propuso una reducción de la carga sólo en la cualitativa para la flexión con derecha (46,9 %) y para la flexión con izquierda (40,7 %).

2.3.1.2.4- Interacción carga-rendimiento de las flexiones de tres apoyos del sujeto 2

En cuanto al segundo sujeto, se presenta un cuadro resumen de los tres ejercicios en el que aparecen los datos obtenidos con el metamodelo en la tabla 3. Aparece una relación mejor en cuanto a los retardos con la curva de carga cuantitativa, y el perfil de reserva es prácticamente el mismo que en el sujeto 1. El PerPot propone una reducción de la carga cualitativa en los mismos casos que en el sujeto 1, de un 45,5 % para la flexión con derecha y de un 18 % para la flexión con izquierda.

TABLA 3 Cuadro resumen de los resultados del sujeto 2 en el estudio de las flexiones de tres apoyos

	FD CC	FD CD	FI CC	FI CD	FS CC	FS CD
Media de la carga	1,88	67,44	1,88	67,44	1,88	67,44
Media del rendimiento	2,31	2,31	2,24	2,24	1,42	1,42
Retardo del estrés	4	7	1,5	6,5	4,5	5,5
Retardo de la respuesta	7,5	2	1	2	8,5	2

FD CC: Flexión con derecha y carga cuantitativa; FD CD: Flexión con derecha y carga cualitativa; FI CC: flexión con izquierda y carga cuantitativa; FI CD: Flexión con izquierda y carga cualitativa; FS CC: Flexión dislocada y carga cuantitativa; FS CD: Flexión dislocada y carga cualitativa.

Las correlaciones cruzadas también mostraron un comportamiento similar al observado en el sujeto 1, y sólo aparecieron correlaciones cruzadas positivas cuando se relacionó el rendimiento con la carga cualitativa, tal y como se muestra en la figura 50.

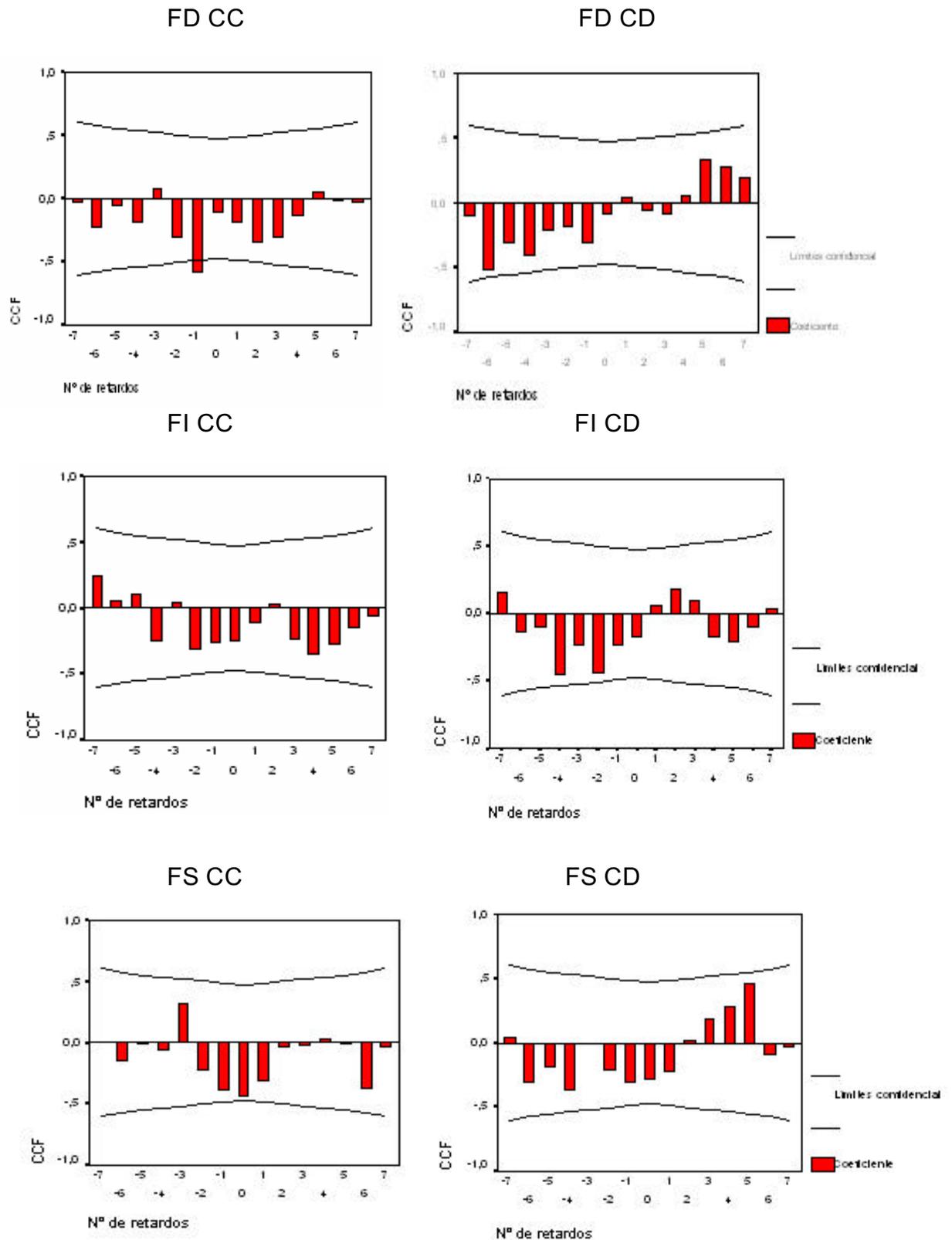


Fig. 50 Correlaciones cruzadas entre el rendimiento del tren superior y los dos tipos de carga en los tres ejercicios del sujeto 2. FD CC: Flexión con derecha, carga cuantitativa; FD CD: Flexión con derecha, carga cualitativa; FI CC: Flexión con izquierda, carga cuantitativa; FI CD: Flexión con izquierda, carga cualitativa; FS CC: Flexión dislocada, carga cuantitativa; FS CD: Flexión dislocada, carga cualitativa.

2.3.2- Resultados de los saltos

2.3.2.1- Cuantificación de las variables

Para analizar las interacciones entre la carga y el rendimiento relacionados con la fuerza dinámica del tren inferior con el PerPot Metamodel y con las correlaciones cruzadas, se requería cuantificar estas variables. En la tabla 4 se muestran los valores obtenidos durante los tres periodos de las variables carga cuantitativa, carga cualitativa, y rendimiento valorando el tiempo de vuelo de los diferentes saltos. También se presentan estas mismas variables gráficamente (véase fig. 51).

En la tabla 5 se muestra la media de toda la carga de cada periodo y la evolución del rendimiento teniendo en cuenta el primer test y el último de cada periodo. Se observa como teniendo en cuenta el volumen tradicional de carga o carga cuantitativa, ésta disminuye de 2,114 a 1,184 en el segundo periodo (44%) con relación al primero para el primer sujeto, y de 2,69 a 1,31 (51,31%) para el segundo sujeto. En el tercer periodo también se disminuye la carga de 1,184 a 0,523 (55,9%) para el primer sujeto y de 1,31 a 0,505 (61,46%) en el segundo sujeto. En cambio, teniendo en cuenta el número de ejercicios distintos o la carga cualitativa, la carga aumenta en el segundo periodo de 26,8 a 45,5 (41,1%) para el primer sujeto y de 30,4 a 69,25 (56,11%) para el segundo. En el tercer periodo disminuye de nuevo de 45,5 a 19,8 (56,49%) para el primer sujeto y de 69,25 a 18,2 (73,72%) para el segundo.

En cuanto al rendimiento, el primer sujeto mantiene los resultados con relación al tiempo de vuelo prácticamente constantes a lo largo de todo el estudio.

El segundo sujeto también parece mantener los resultados, aunque disminuye ligeramente su rendimiento en todos los periodos.

TABLA 4 Cuantificación de la carga y el rendimiento en cuanto a los saltos en ambos sujetos

Sujeto 1

Semanas	CC	CD	t SE(s)
1	2,340	36	0,540
2	3,010	36	0,550
3	2,330	29	0,570
4	2,890	33	0,560
5	0,000	0	0,540
6	2,220	27	0,560
7	1,239	10	0,560
8	2,493	40	0,560
9	0,517	10	0,567
10	0,772	31	0,570
11	1,007	102	0,560
12	0,989	90	0,557
13	0,233	54	0,544
14	0,064	8	0,543
15	0,070	7	0,544
16	0,718	32	0,577
17	0,666	26	0,537
18	1,099	26	0,537

Sujeto 2

Semanas	CC	CD	t SE (s)	t SC (s)	t SCG (s)
1	4,179	37	0,604	0,614	0,543
2	3,138	36	0,530	0,583	0,543
3	3,102	45	0,554	0,574	0,544
4	3,032	34	0,544	0,577	0,543
5	0,000	0	0,576	0,587	0,543
6	2,623	136	0,560	0,582	0,547
7	0,892	70	0,543	0,576	0,550
8	1,961	71	0,544	0,587	0,534
9	1,907	53	0,553	0,567	0,537
10	0,000	0	0,545	0,563	0,582
11	1,115	50	0,537	0,560	0,634
12	1,420	130	0,543	0,583	0,534
13	0,560	44	0,530	0,573	0,507
14	0,289	18	0,543	0,583	0,526
15	0,563	22	0,540	0,576	0,526
16	0,245	9	0,550	0,577	0,527
17	0,767	18	0,504	0,587	0,530
18	0,663	24	0,517	0,560	0,520

CC: Carga clásica o cuantitativa; CD: Carga en cuanto al número de variaciones o cualitativa; t SE (s): Tiempo de vuelo durante la ejecución del salto en espagat en segundos; t SC (s): Tiempo de vuelo durante la ejecución del salto en carpa en segundos; t SCG (s): Tiempo de vuelo durante la ejecución del salto en carpa con giro en segundos

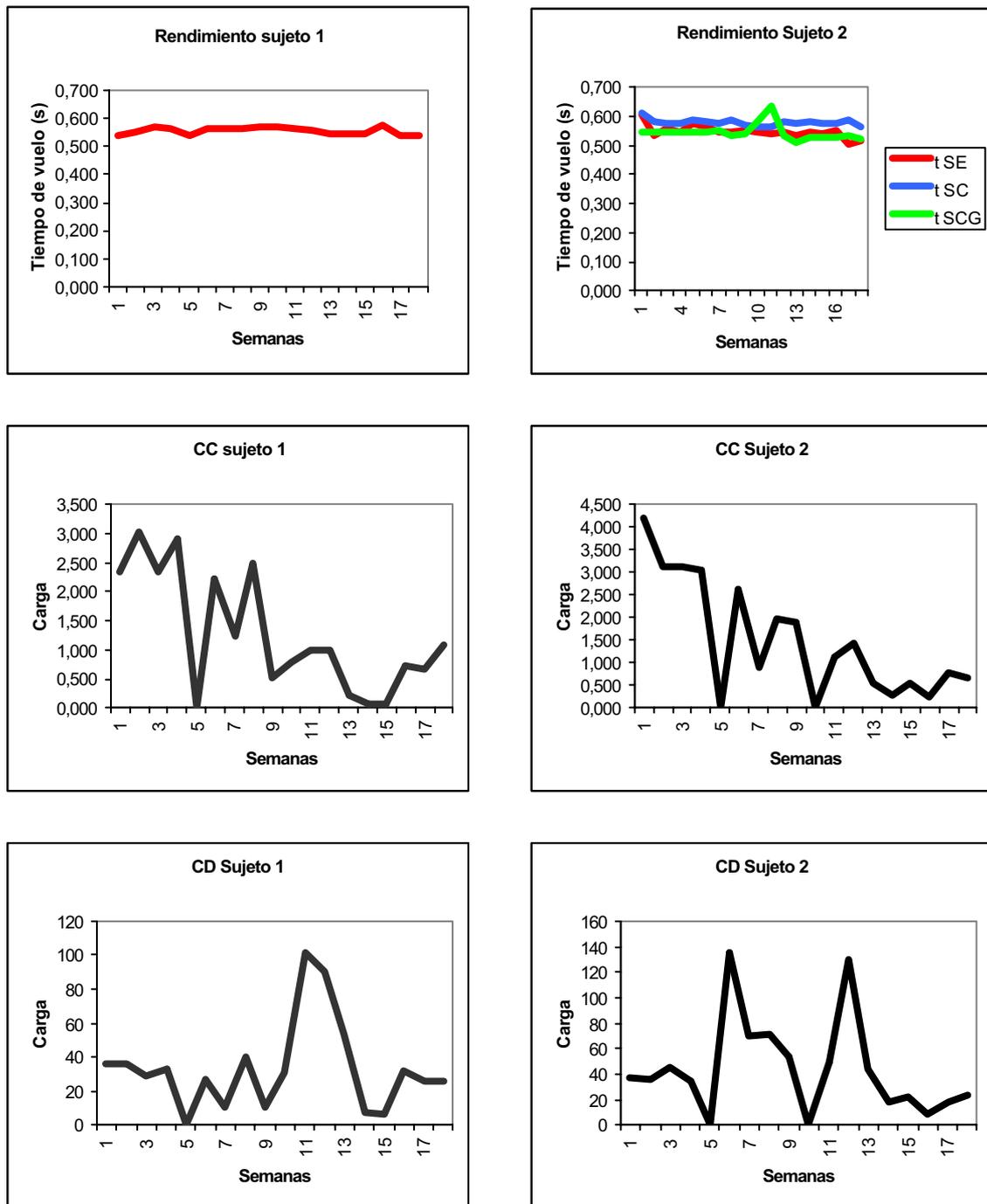


Fig. 51 Cuantificación de la carga y el rendimiento en cuanto a los saltos en ambos sujetos. t SE: Tiempo de vuelo en segundos del salto en espagat; t SC: Tiempo de vuelo en segundos del salto en carpa; t SCG: Tiempo de vuelo en segundos del salto en carpa con giro.

TABLA 5 Media de toda la carga de cada periodo y la evolución del rendimiento teniendo en cuenta la diferencia entre el primer test y el último de cada periodo en los dos sujetos en el estudio de los saltos

Sujeto 1

Periodos	Media CC	Media CD	ti-tf SE (s)
1	2,114	26,8	0
2	1,184	45,500	-0,016
3	0,523	19,8	-0,006

Sujeto 2

Periodos	Media CC	Media CD	ti-tf SE (s)	ti-tf SC (s)	ti-tf SCG (s)
1	2,69	30,4	-0,028	-0,027	0
2	1,310	69,250	-0,030	-0,090	-0,040
3	0,505	18,2	-0,026	-0,023	-0,006

CC: Carga clásica o cuantitativa; CD: Carga en cuanto al número de diferencias o variaciones o cualitativa; ti-tf SE (s): Tiempo de vuelo inicial menos tiempo de vuelo final en segundos del salto en espagat; ti-tf SC (s): Tiempo de vuelo inicial menos tiempo de vuelo final en segundos del salto en carpa; ti-tf SCG (s): Tiempo de vuelo inicial menos tiempo de vuelo final en segundos del salto en carpa con giro.

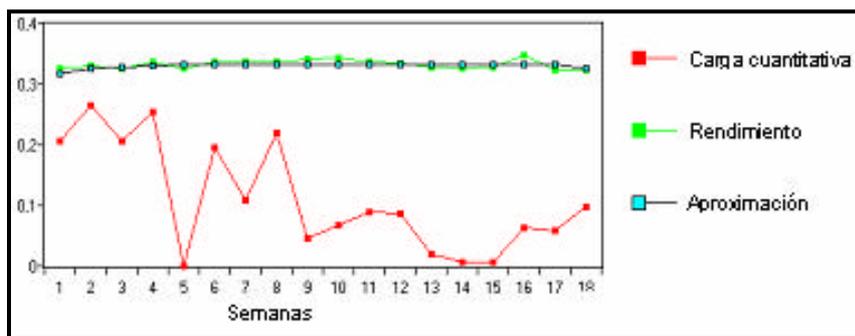
2.3.2.2- Interacción carga-rendimiento de los saltos

Se realizó el análisis de la interacción entre la carga y el rendimiento utilizando el PerPot Metamodel y por correlaciones cruzadas para poder tener en cuenta las correlaciones existentes entre ambas variables en el mismo momento en que se produjeron o con periodos de diferencia entre ellos.

2.3.2.2.1- Interacción carga-rendimiento del sujeto 1 en los saltos

En la figura 52 se muestra la relación entre la curva de rendimiento del salto en espagat y la curva de carga cuantitativa del tren inferior del sujeto 1. En la figura 53 se muestra la misma relación pero utilizando el análisis de correlaciones cruzadas.

El rendimiento se mantuvo prácticamente constante a lo largo de todo el estudio, por lo que ya podríamos concluir que ambos tipos de carga tuvieron un efecto muy similar y prácticamente nulo sobre la variable estudiada. Los resultados de las correlaciones cruzadas mostraron una relación positiva excepto en el primer periodo, aunque los resultados no fueron significativos. El PerPot detectó una relación positiva entre los retardos, siendo mayor el de respuesta que el de estrés.



	Sujeto 1 se CC
Dev. ori	1.88
Dev. opt	0.19
Carga _{media}	1.26
Pef _{media}	0.55
D stress	3.0
D resp	6.0

Fig. 52 Relación entre la curva de rendimiento del salto en espatat y la curva de carga cuantitativa del tren inferior del sujeto 1. se: Salto en espatat; CC: Carga cuantitativa; Dev.ori: Desviación de los datos originales; Dev. opt: Desviación de los datos una vez optimizados; Carga media: Media de la carga; Pef media: Media del rendimiento; D stress: Retardo del estrés; D resp: Retardo de la respuesta

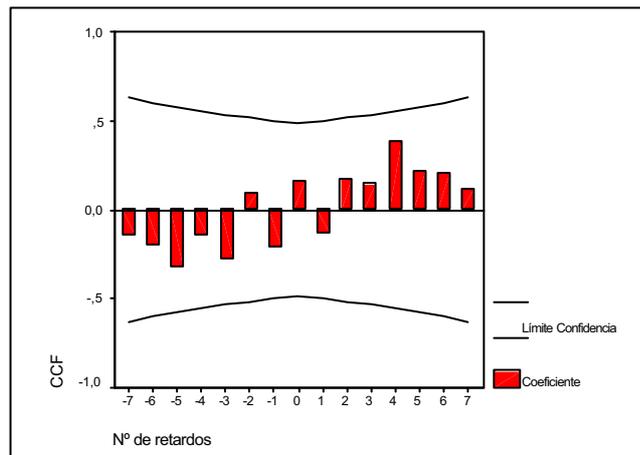
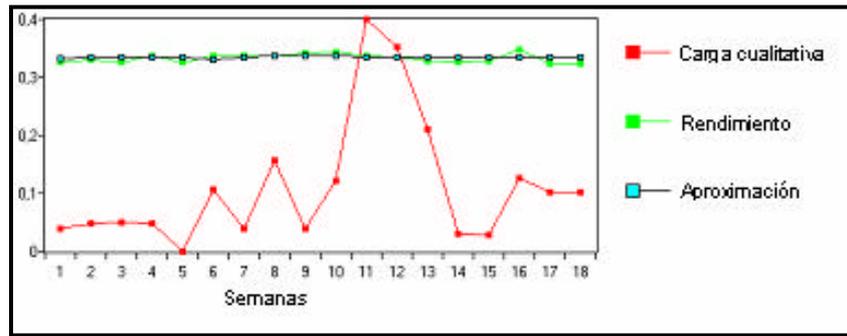


Fig. 53 Correlaciones cruzadas entre la carga cuantitativa y el rendimiento del salto en espatat del sujeto 1. CCF: Coeficiente de correlación.

La figura 54 muestra las relaciones y análisis anteriores pero con la variable carga cualitativa. El análisis del PerPot Metamodel muestra una peor relación teniendo en cuenta los retardos de estrés y de respuesta. El logaritmo genético propuso una reducción de la carga en un 54 %, ya que detectó un colapso al aumentar la carga en el periodo de entrenamiento diferencial. El análisis por correlaciones cruzadas mostró una relación negativa entre la carga y el rendimiento, aunque los resultados no fueron significativos (véase fig. 55).



	Sujeto 1 se CD
Dev. ori	1.96
Dev. opt	0.28
Carga _{media}	28.33
Pef _{media}	0.55
D stress	7.5
D resp	2.0

Fig. 54 Relación entre la curva de rendimiento del salto en espatat y la curva de carga cualitativa del tren inferior del sujeto 1. se: Salto en espatat; CD:Carga cualitativa. Dev.ori: Desviación de los datos originales; Dev. opt: Desviación de los datos una vez optimizados; Carga media: Media de la carga; Pef media: Media del rendimiento; D stress: Retardo del estrés; D resp: Retardo de la respuesta

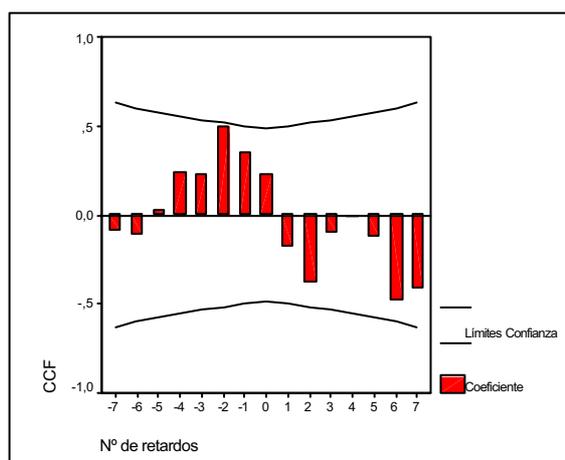


Fig. 55 Correlaciones cruzadas entre el rendimiento y la carga cualitativa del tren inferior del sujeto 1. CCF: Coeficiente de correlación.

2.3.2.2- Interacción carga-rendimiento del sujeto 2 en los saltos

En cuanto al segundo sujeto, en la tabla 6 se presenta un cuadro resumen de los tres ejercicios que sirvieron como test del rendimiento del tren inferior en el que aparecen los datos obtenidos con el metamodelo. El PerPot detecta relaciones contradictorias entre la carga y el rendimiento en función del ejercicio analizado. Para la carpa y para el salto en espagat aparece una relación positiva entre los retardos de estrés y de respuesta utilizando los dos tipos de carga. En la carpa con giro, en cambio, la relación es negativa cuando se utiliza la carga cuantitativa y positiva cuando se utiliza la cualitativa. En este último caso, el PerPot propuso una reducción de la carga cuantitativa de un 25 %.

TABLA 6 Cuadro resumen de los resultados del sujeto 2 en el estudio de los saltos

	SE CC	SE CD	C CC	C CD	CG CC	CG CD
Media de la carga	1,47	44,58	1,47	44,58	1,47	44,58
Media del rendimiento	0,55	0,55	0,58	0,58	0,54	0,54
Retardo del estrés	3	2,5	3	3	7	4
Retardo de la respuesta	6	5	6	6	2	7,5

SE CC: Salto en espagat y carga cuantitativa; SE CD: Salto en espagat y carga cualitativa; C CC: carpa y carga cuantitativa; C CD: Carpa y carga cualitativa; CG CC: Carpa con giro y carga cualitativa.

Las correlaciones cruzadas también mostraron resultados contradictorios en función del test utilizado, tal y como se puede observar en la figura 56.

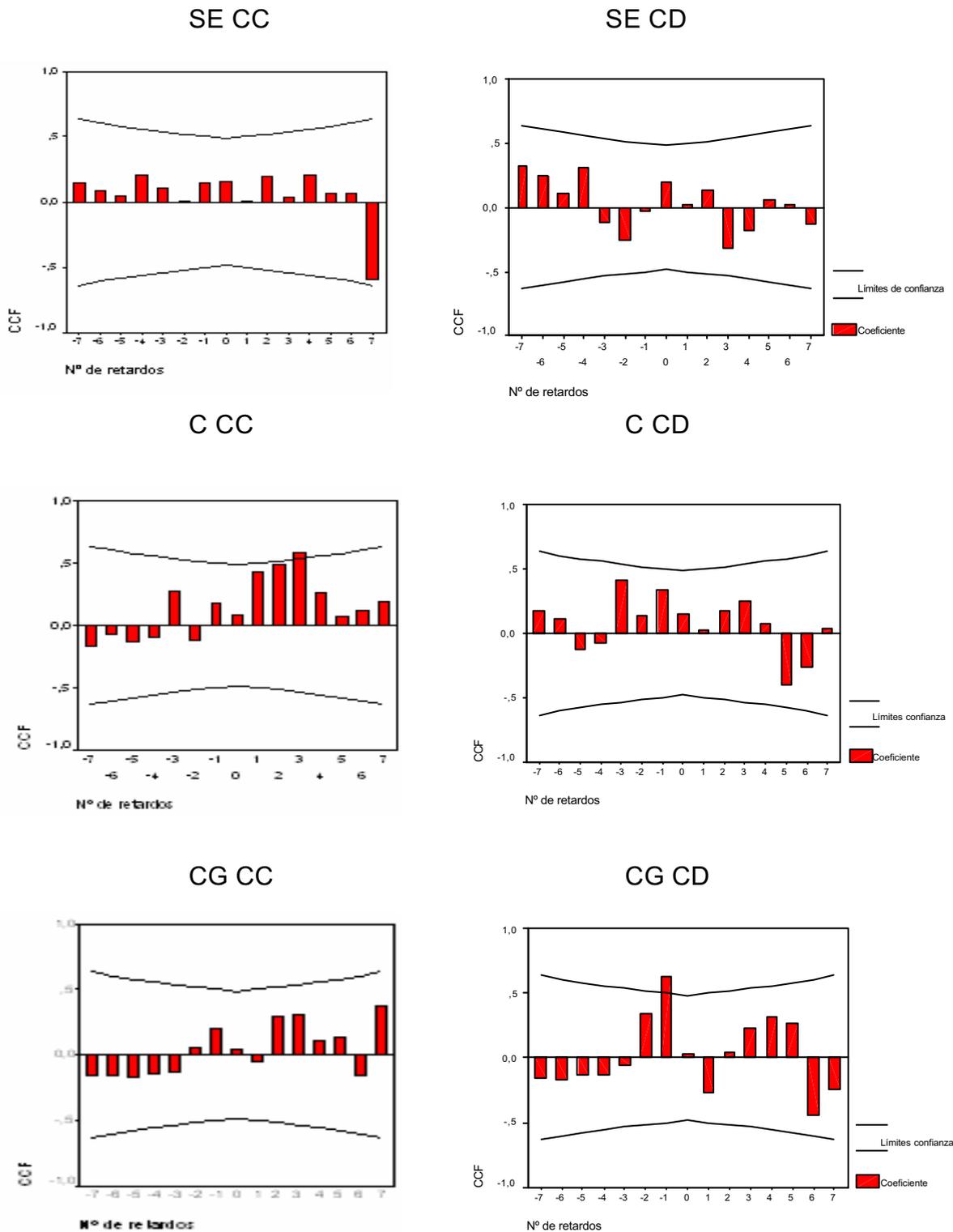


Fig. 56 Correlaciones cruzadas entre el rendimiento del tren inferior y los dos tipos de carga en los tres ejercicios del sujeto 2. SE CC: Salto en espatag, carga cuantitativa; SE CD: Salto en espatag, carga cualitativa; C CC: Carpa, carga cuantitativa; C CD: Carpa, carga cualitativa; CG CC: Carpa con giro, carga cuantitativa; CG CD: Carpa con giro, carga cualitativa

2.4- Discusión

2.4.1- Discusión de los resultados de las flexiones de tres apoyos

De los resultados del análisis de medias de carga aplicada al tren superior podemos deducir que en el segundo periodo se disminuyó la carga teniendo en cuenta el concepto tradicional pero se aumentó el número de ejercicios diferentes. En cuanto a la evolución del rendimiento de las flexiones de tres apoyos teniendo en cuenta el primer y el último test de cada periodo, parece ser que aumentó más durante el periodo de entrenamiento diferencial en ambos sujetos. Este hecho nos parece remarcable, especialmente porque en el periodo TTa y TTb el entrenamiento fue específico para los tests mediante los cuales se evaluaba el rendimiento. En cambio, en el periodo DT no se entrenaba específicamente para dichos tests.

Si se observa lo que sucede en cada test, la mejora total fue clara en ambos sujetos a lo largo de todo el estudio, especialmente en el sujeto 1 (que partía de una peor ejecución inicial). Existió una gran variabilidad de semana a semana, resaltando la importancia de realizar estudios con tests periódicos utilizando el análisis de series temporales y no con tests puntuales al finalizar cada periodo. Teniendo en cuenta estos resultados, se podría concluir que el entrenamiento diferencial produjo un mayor aumento del rendimiento que el tradicional. Los estudios de diferentes deportes que han comparado el entrenamiento tradicional con el diferencial aplicando cada uno a un grupo distinto de sujetos han llegado a conclusiones similares (Jaitner y Pfeiffer, 2003; Schönherr y Schöllhorn, 2003, Trockel y Schöllhorn, 2003). No obstante, en el presente estudio este tipo de análisis no tuvo en cuenta la carga impuesta con anterioridad a la ejecución del test y por tanto no tuvo en cuenta el proceso de adaptación fisiológico natural de todo sujeto en el que se producen retardos en las respuestas. La carga impuesta en el periodo TTa pudo afectar los resultados del periodo DT, y la carga impuesta

en el periodo DT pudo afectar los resultados del periodo TTb. A su vez, la duración de cada periodo también pudo influir en los resultados.

El análisis de correlaciones cruzadas y el llevado a cabo por el PerPot Metamodel sí tiene en cuenta dicho proceso, aunque nos dieron resultados distintos. Las correlaciones cruzadas mostraron como el aumento de carga cuantitativa correlacionaba negativamente con el aumento en el rendimiento en los tres tipos de tests y en ambos sujetos, de lo que se podría deducir que los sujetos mejoraban más cuando entrenaban menos. Este es un resultado frecuente en la investigación, especialmente cuando se estudia el efecto inmediato de la carga sobre el rendimiento, pero no se suele observar la interrelación entre ambas variables con el efecto del retardo en la aparición de respuestas. En cambio, cuando la carga se cuantificó de forma cualitativa se vieron correlaciones positivas del aumento de carga con el aumento del rendimiento, mostrando que el aumento de las variaciones favorecía el rendimiento de los sujetos. El primer sujeto mostró correlaciones positivas a partir del periodo 3 (un retardo de tres semanas) entre la carga cualitativa y el rendimiento de la flexión con derecha y en todos los periodos o retardos positivos para los otros dos ejercicios. El segundo sujeto mostró un comportamiento similar, y aunque las correlaciones fueron de bajo valor y no significativas, nos parece muy interesante que dicho fenómeno sólo se diera cuando la carga se valoraba cualitativamente y no cuando se valoraba cuantitativamente. De ello se puede deducir que ambos sujetos respondieron mejor a un aumento en cuanto a la variación de los estímulos que a un aumento en cuanto a la cantidad de carga cuantitativa.

Acorde con la anterior conclusión, el PerPot Metamodel detectó una mejor relación entre la carga cuantitativa y el rendimiento en el periodo de entrenamiento diferencial que en el primero de entrenamiento tradicional, pero globalmente consideró que la cantidad de carga cuantitativa administrada a los sujetos fue la adecuada. En cambio, consideró que la cantidad de variaciones fue excesiva y propuso una disminución del número de estas variaciones para no llevar al sujeto a un estado de

sobreentrenamiento. Probablemente, esto es debido a la gran diferencia que existió entre el número de variaciones que se propusieron en el periodo de entrenamiento diferencial y el que se produjo en los periodos de entrenamiento tradicional (TTa:27, DT:150,25 y TTb:19,2 variaciones semanales para el sujeto 1; TTa:25, DT:122,75 y TTb: 21,4 variaciones semanales para el sujeto 2). Debido a que en los tres periodos de entrenamiento hubo una mejoría, el PerPot Metamodel consideró excesivo el gran aumento de carga propuesto a pesar de que las ganancias de rendimiento fueran mayores en ese periodo, y consideró que un aumento menor habría sido suficiente para conseguir los mismos o mejores resultados sin que hubiera peligro de sobreentrenamiento. El sobreentrenamiento puede producirse cuando el entrenamiento excede la habilidad del atleta para adaptarse (McKenzie, 1999). Por este mismo motivo, el PerPot detectó que la carga cualitativa producía un retardo de estrés mayor que el de respuesta, hecho que no sucedía con la carga cuantitativa. Probablemente este hecho no se había producido en otros estudios en los que el PerPot se ha utilizado porque la forma en la que se había cuantificado siempre la carga era de la manera que aquí denominamos cuantitativa (Mester et al., 2000). Las exigencias coordinativas del entrenamiento no se suelen tener en cuenta para valorar la carga impuesta a los deportistas, por lo que es posible que el PerPot necesite una adaptación para valorar este tipo de diferencias en la carga. No obstante, consideramos muy útiles estos resultados porque posiblemente también un exceso en cuanto a las exigencias coordinativas del entrenamiento puede llevar al sujeto a un estado de sobreentrenamiento.

Se debería investigar en un futuro la cuantificación de la carga teniendo en cuenta aspectos coordinativos tal y como hemos hecho aquí y como interactúa ésta con el rendimiento deportivo. No hemos encontrado otros estudios en los que se valore la carga con esta metodología, por lo que nos falta contrastar estos resultados con otros.

No hay que olvidar que la carga ha sido la misma en los dos tipos de valoraciones, y lo que hemos modificado ha sido el tipo de cuantificación realizada. Por ello centramos nuestro análisis en observar qué tipo de incremento correlaciona mejor con el incremento del rendimiento.

Cabe destacar la sorprendente similitud en el comportamiento de ambos sujetos, lo que aumenta la generalización de los resultados observados. Debido a estos resultados, consideramos que posiblemente el mejor tipo de entrenamiento no será el que se base exclusivamente en el entrenamiento tradicional ni el que se base exclusivamente en el entrenamiento diferencial. Una combinación de ambos o una administración en función del estado en el que se encuentre el sujeto puede ser lo más adecuado. Al inicio del aprendizaje de cualquier acción motriz específica puede ser muy útil la utilización de un entrenamiento tradicional para crear un atractor que estabilice la técnica de ejecución de dicha acción. Una vez estabilizada, para aumentar el rendimiento, el entrenamiento deberá variar sus propuestas, por lo que el entrenamiento diferencial nos puede ser de gran ayuda. Sin embargo, éste puede estar compuesto por una combinación también de ambas propuestas, en función del tipo de sesión. En nuestro caso, por ejemplo, podríamos haber utilizado el entrenamiento diferencial para los entrenamientos en la sala de musculación, una combinación de ambos en las sesiones de ejercicios específicos y con aparatos gimnásticos y el entrenamiento tradicional en las sesiones dedicadas a las dificultades que aparecerán en la coreografía de competición.

Los estudios relacionados con la práctica variable también hacen propuestas similares. Lai et al. (2000) concluyen que en una primera fase del aprendizaje, es preferible la práctica constante para desarrollar un GMP estable, y mejorar éste en una siguiente fase mediante la práctica variable. Pigott y Shapiro (1984) consideran la práctica variable especialmente útil para mejorar tareas estabilizadas. Los estudios sobre interferencia contextual también sugieren que en el inicio del aprendizaje de tareas abiertas altos niveles de interferencia contextual no facilitan el proceso. En

cambio, lo consideran muy beneficioso para un segundo periodo de aprendizaje o para aprender tareas cerradas (Magill y Hall, 1990).

Otro aspecto interesante para investigar en un futuro es cómo afecta el entrenamiento diferencial al aprendizaje de nuevas tareas. En lugar de proponer tests de dificultades entrenadas específicamente, podíamos haber propuesto variaciones de la tarea nuevas para los sujetos. A juzgar por el modo en el que las gimnastas, a lo largo de las ocho semanas del segundo periodo DT, se fueron adaptando al nuevo método de entrenamiento y a las variaciones que constantemente se les proponían, probablemente los resultados hubieran sido claramente favorables para el entrenamiento diferencial. No obstante, este tipo de evaluación, teniendo en cuenta el tipo de tarea que estábamos estudiando, hubiese complicado la metodología de análisis y la objetivación de los resultados.

Así, en cuanto al rendimiento en la ejecución de flexiones de brazos de tres apoyos, este estudio nos sugiere que el entrenamiento diferencial provocó una mejoría mayor en los dos sujetos que el entrenamiento tradicional basado en repeticiones. El aumento de la carga teniendo en cuenta el número de variaciones correlacionó positivamente con el aumento del rendimiento, mientras que el aumento de la carga en cuanto a la intensidad y volumen de ejercicios correlacionó negativamente. No obstante, el número de variaciones fue quizá excesivo y se podrían haber conseguido los mismos resultados disminuyendo este número realizando una combinación de entrenamiento tradicional con diferencial en el segundo periodo del estudio. Se debería investigar la efectividad de este tipo de entrenamiento combinado. Especialmente interesante sería investigar en qué momentos de la evolución del rendimiento de los atletas puede ser más efectivo aplicar un tipo u otro de entrenamiento. Para ello, se necesitaría encontrar una variable que identificase el estado del atleta en cuanto a la estabilidad del aprendizaje.

También sería interesante repetir este estudio con sujetos de características diferentes con el fin de determinar en qué tipo de condiciones pueden generalizarse estos resultados.

2.4.2- Discusión de los resultados de los saltos

El rendimiento de ambos sujetos en cuanto a los tests de salto no aumentó en todo el estudio y se mantuvo prácticamente constante, mostrando de nuevo una gran similitud entre el comportamiento de los dos sujetos. Debido a este resultado, no podemos valorar qué tipo de entrenamiento fue mejor o qué tipo de cuantificación de la carga correlacionó mejor con el rendimiento.

En el sujeto 2 se observó incluso un descenso en el rendimiento. Esto nos hace suponer que el entrenamiento en todos los periodos no fue el adecuado, que las gimnastas habían llegado a su límite potencial de mejora o que la variable utilizada para valorar el entrenamiento (tiempo de vuelo) no es suficientemente sensible a las mejorías que quizá nuestras atletas habían experimentado.

La ejecución de este tipo de dificultades se valora teniendo en cuenta la altura del salto reflejada en el tiempo de vuelo (Asmussen y Bonde-Petersen, 1974), pero también se valora la alineación corporal (especialmente de la línea de las piernas y pies), la altura conseguida por las piernas (resultado de la velocidad y la flexibilidad del tren inferior pero no necesariamente de una mayor altura de vuelo) o la estabilidad, precisión y suavidad en el impulso y la recepción. En el inicio del aprendizaje, probablemente 4 meses son suficientes para mejorar considerablemente el tiempo de vuelo en todo tipo de saltos, pero cuando el sujeto ya tiene años de experiencia es posible que se necesite buscar otra variable para estudiar el rendimiento.

Así, en cuanto al rendimiento en la ejecución de saltos específicos de la gimnasia aeróbica, el entrenamiento no fue el adecuado para mejorar el

tiempo de vuelo en sujetos experimentados. Se requiere más investigación para comprobar si existen otras variables más sensibles a los cambios sufridos por los atletas o si otro tipo de entrenamiento hubiera provocado un aumento en el tiempo de vuelo.

La comparación de dos métodos de entrenamiento, el contraste entre dos formas de cuantificar la carga y entre dos herramientas de análisis, así como la evaluación de la interacción de la carga con el rendimiento en dos tipos de ejercicios que involucran grupos musculares claramente diferenciados en un estudio de casos ha llevado a que se puedan generar diversas hipótesis. Una de ellas ha posibilitado el diseño del segundo estudio, pero a su vez han surgido otras, como la posibilidad de que el aumento de exigencias coordinativas pueda llevar a un estado de sobreentrenamiento, la necesidad de adaptar el PerPot metamodel a un tipo de carga cualitativa o la posibilidad de que el mejor entrenamiento no sea el que se base únicamente en repeticiones o únicamente en variaciones, sino una combinación de ambos en función del estado del sujeto.

3- Estudio 2- Fluctuaciones y estabilidad en la ejecución del salto vertical

3.1- Introducción

3.1.1- El salto vertical

El salto vertical se ha estudiado ampliamente desde el punto de vista biomecánico y fisiológico. Teóricamente, la altura del salto dependerá del impulso vertical:

$$Iv = F (t_2 - t_1)$$

Iv: Impulso vertical; F: Fuerza; t: Tiempo

Pero en la realidad, el ser humano es mucho más complejo y muchos otros factores intervienen. La energía efectiva que tenga el centro de masas del cuerpo en el momento del despegue determinará la fase de vuelo del sujeto. Esta energía efectiva será la suma de la energía potencial del centro de masas del cuerpo y la energía cinética producida por la velocidad vertical del mismo centro de masas (Bobbert y van Ingen, 1988). Esta energía efectiva dependerá de diversos factores, como las características musculares, las posiciones de las palancas y los músculos encargados de movilizar dichas palancas, o la técnica de ejecución del salto (Bobbert et al., 1987; Kovács et al., 1999).

Para aumentar la eficacia del salto (altura) se realiza un estiramiento previo de la musculatura implicada. Este tipo de salto, cuando se realiza con los pies juntos, se denomina Counter Movement Jump o CMJ, tal y como lo describe Bosco (1994). Es éste un salto muy interesante a analizar, ya que el estiramiento previo se produce siempre en los saltos deportivos y parece que en cualquier tipo de salto. Incluso en aquellos saltos en los cuales se

pretende minimizar este estiramiento (Squat Jump) siempre se produce aunque el sujeto no lo perciba (Pandy y Zajac, 1991). El estiramiento previo aumenta el impulso vertical por aumento del área gracias a la adición del impulso de frenado, y produce el tan estudiado ciclo de estiramiento-acortamiento (CEA) (Asmussen et al., 1974; Cavagna et al., 1968; Komi y Bosco, 1978). Las ventajas de la utilización del CEA están relacionadas con el aumento de la fuerza inicial, con la intervención del reflejo miotático y por los elementos elásticos de los músculos.

El salto con preestiramiento o contramovimiento se divide en diversas fases:

- a) Fase de preactivación: periodo comprendido desde la aparición de cierta actividad muscular hasta que se comienza a ejercer fuerzas contra los elementos externos. Proporciona al músculo la rigidez necesaria frente al estiramiento y permite acumular la suficiente energía potencial elástica que se utilizará posteriormente en la contracción concéntrica. También aumenta la actividad muscular de los antagonistas.
- b) Contracción muscular excéntrica: La oposición al estiramiento resulta de la rigidez conseguida en la fase anterior.
- c) Fase de acoplamiento: periodo necesario para invertir la dirección del movimiento (contracción isométrica).
- d) Fase de contracción concéntrica

El objetivo fundamental de cualquier salto vertical será alcanzar la máxima velocidad vertical en el despegue, debido a que la altura conseguida por el centro de gravedad dependerá de la velocidad vertical y de la posición en el despegue. Para el estudio de estas fases y su relación con la altura conseguida, se suele analizar, mediante el uso de plataformas de fuerza, la curva de fuerza vertical del impulso y sus diferentes parámetros. Los más utilizados son seguramente el tiempo de contacto con la plataforma, el

máximo pico de la fuerza vertical, el tiempo en llegar a dicho pico o el máximo pico de potencia vertical (véase fig. 57). Dowling y Vamos (1993) estudiaron la correlación de dichas variables, además de otras como el impulso negativo, el ratio entre el impulso negativo y el positivo o la duración de las diferentes fases del salto, con la altura de los saltos. Observaron pobres correlaciones a excepción del pico máximo de potencia con la altura del salto, y grandes diferencias individuales entre los sujetos. Tampoco un elevado pico de fuerza es suficiente para ejecutar un buen salto, ya que debe de ir acompañado de una coordinación adecuada. Así mismo, parece que es conveniente un bajo ratio de impulso negativo/positivo, pero como consecuencia de un impulso positivo grande y no de uno negativo pequeño. También se ha estudiado ampliamente la intervención de los diferentes grupos musculares mediante estudios electromiográficos y la construcción de modelos dinámicos biomecánicos (Nagano et al., 2001; Pandy et al., 1990; Spägele et al., 1999). No obstante, las relaciones causales no están muy demostradas, y, como se ha dicho anteriormente, el único predictor claro que se ha encontrado es la potencia muscular ejercida.

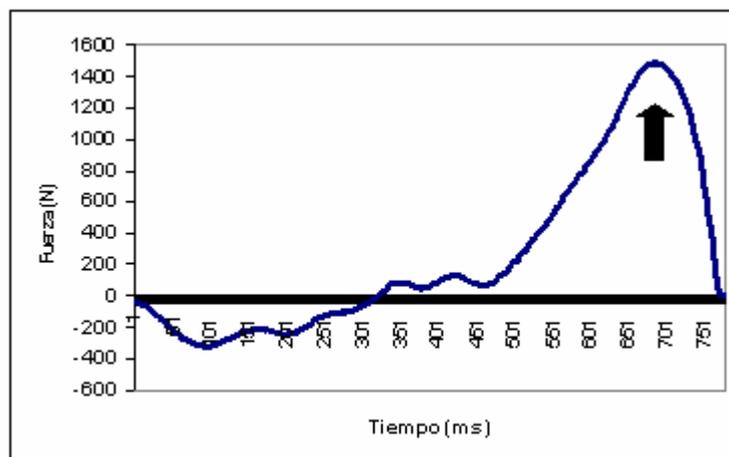


Fig. 57 Curva fuerza-tiempo o serie temporal de la fuerza vertical de un CMJ. La flecha indica el pico máximo de aplicación de la fuerza vertical.

El salto puede también venir precedido de un aterrizaje, tal y como sucede en los denominados drop jumps (DJ) (Bosco, 1994). Este tipo de saltos se

puede desglosar en las mismas fases que el CMJ, aunque se producirán ciertas diferencias. En la primera, la fase de preactivación, la intensidad de la actividad muscular será mayor, ya que el sujeto espera un impacto más fuerte (Santello et al., 2001). En la segunda, la fase de contracción muscular excéntrica, la oposición al estiramiento será más fuerte como consecuencia del impacto, y no se producirá el desplazamiento negativo de la curva F-t observado en los CMJ, sino que la fuerza aumentará desde el primer contacto con el suelo hasta un primer pico que representará el peso inicial pasivo del sujeto (véase fig. 58). Según un estudio realizado por Fowler y Less (1998), este pico ocurre en la componente vertical a los primeros 80 ms después del impacto. En esta misma fase habrá un segundo pico a los 0,15 s aproximadamente, que representará el pico de aceleración positiva durante el cual se reduce la velocidad del cuerpo por la acción excéntrica de los extensores de la cadera, la rodilla y el tobillo. Este tiempo parece coincidir con el tiempo de respuesta del reflejo funcional de estiramiento. La tercera fase, la fase de acoplamiento, es un poco más corta que en los CMJ, y parece importante que sea efectivamente más corta para aprovechar al máximo el CEA. En la última fase, la de la contracción concéntrica, se producirá un tercer pico como consecuencia de la contracción concéntrica de los músculos previamente estirados para poder realizar el despegue.

Según el mismo estudio de Fowler y Less, la segunda fase tiene una duración del 45% del total, la tercera un 18% y la cuarta un 37%. Observando la secuencia de los movimientos de las articulaciones y del centro de masas, se demuestra que las máximas velocidades de flexión de tobillo y rodilla se alcanzan a los $0,04 \pm 0,02$ s después del aterrizaje. La máxima velocidad de flexión de la cadera ocurre después de $0,05 \pm 0,02$ s y la mínima velocidad del centro de masas ocurre en el aterrizaje. La fase de despegue se inicia con una extensión de la cadera seguida de una extensión de la rodilla.

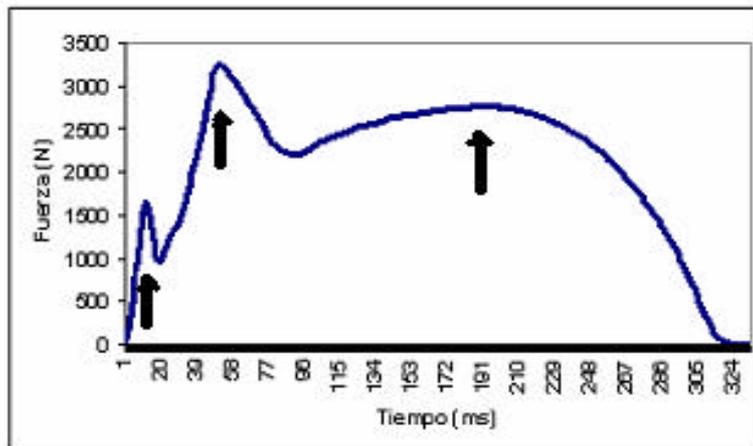


Fig. 58 Curva fuerza-tiempo o serie temporal de la fuerza vertical característica de un Drop Jump. La primera flecha señala el primer pico que corresponde al peso inicial pasivo del sujeto. El segundo corresponde a la acción excéntrica de los extensores del tren inferior. El tercer pico corresponde a la acción concéntrica de dicha musculatura.

Teniendo en cuenta este estudio, en las series temporales de la fuerza de cualquier DJ observaríamos fluctuaciones que se darían a frecuencias aproximadas de entre 8 y 30 HZ fruto del peso inicial del sujeto, de la aceleración positiva del cuerpo, de la contracción de la musculatura agonista y de los mecanismos de estabilización e impulso del tobillo y rodilla y de la cadera.

Este tipo de salto será el que utilizaremos para nuestro estudio, aunque con diferentes variantes. Observamos que la modificación de la altura del salto produce variaciones en las series temporales de la fuerza. De la misma forma observamos que se producían modificaciones al variar la distancia desde la que se saltaba para realizar el DJ, ya que se modificaba especialmente el componente anteroposterior de la fuerza.

El aumento de la distancia desde la que se realizaba el DJ provoca en el organismo una fuerza en el eje anteroposterior que desviará la orientación del cuerpo de la posición óptima para ejecutar un salto vertical y se producirá un momento de fuerza debido a la desalineación de la fuerza de gravedad y las fuerzas de reacción de la superficie de apoyo.

El aumento de la altura del salto incrementará la fuerza en el eje vertical que deberá soportar el sujeto e incrementará el tiempo que necesitará el sujeto para adoptar la posición ideal para saltar.

La altura o la distancia del salto se convierten así en dos variables cuantificables que adoptamos como parámetro de control para nuestro estudio.

3.1.2- La estabilidad

La estabilidad puede definirse como el estado en el que los movimientos incontrolados de percepción y acción de los sistemas se minimizan, y como consecuencia de ello el equilibrio puede ser mantenido. El equilibrio, en biomecánica, significa mantener el cuerpo en unas posiciones determinadas sin perderlas, o puede llegar a ser, simplemente, el impedir una caída. Para mantener dicho equilibrio, se deberá mantener la prolongación del vector peso hacia el suelo aplicado en el centro de gravedad de la persona, dentro de la base de sustentación (Aguado, 1993),

La regulación de este equilibrio es un prerrequisito para la iniciación y continuación de cualquier movimiento dirigido (Mester, 2000; Riccio y Stoffregen, 1988). No obstante, la estabilidad no es sinónima de inmovilidad, sino que para mantener el equilibrio en bipedestación se debe producir un balanceo anteroposterior y lateral. Este balanceo parece ser necesario para que el organismo esté preparado para soportar perturbaciones del equilibrio. Estas perturbaciones pueden ser fuerzas externas que modifiquen la situación de equilibrio del cuerpo (fuerzas perturbadoras). Para mantener el equilibrio será necesario que la resultante entre la fuerza perturbadora y la fuerza peso caiga dentro de la base de sustentación (Aguado, 1993). Se producen dos tipos de balanceo regulados por dos subsistemas independientes: el que controla el balanceo anteroposterior y el que controla el balanceo mediolateral (Balasubramaniam et al., 2000; Winter et al., 1996).

El organismo es un sistema multisegmentario que puede controlar el equilibrio de diferentes maneras en las que intervienen multitud de articulaciones, pero se describen dos estrategias principales para regular este equilibrio: la estrategia del tobillo y la de la cadera. La primera controla los cambios del centro de masas movilizándolo los pies y la articulación del tobillo, moviendo el cuerpo como un péndulo sencillo invertido. La segunda viene determinada por movimientos anteroposteriores y laterales de la cadera, moviendo el cuerpo como si fuera un péndulo doble invertido. Esta última parece ser la más efectiva para controlar el centro de masas con el mínimo esfuerzo neural (Lekhnel et al., 1994). El movimiento del resto de las articulaciones, especialmente de la rodilla, también influirá en la estabilidad (Iqbal y Pai, 2000). La combinación de ambas estrategias y de su relación con el resto del organismo configura una región donde el sujeto es capaz de mantener el equilibrio sin caerse.

Si se produce una perturbación de la posición de equilibrio, el sujeto podrá reequilibrarse siempre y cuando sea capaz de posicionar la fuerza resultante entre la fuerza peso y la perturbadora de forma que caiga dentro de la base de sustentación. Que esto suceda dependerá de la perturbación, pero también de la fuerza muscular generada por el sujeto y de la rigidez de la superficie de apoyo (Ricci, 1991). Si el sujeto no es capaz de reequilibrarse sin modificar la base de sustentación podrá optar por dos alternativas: aumentar dicha base abriéndola en el mismo sentido del desequilibrio o de la fuerza perturbadora (por ejemplo, adelantando un pie si se está en bipedestación y se produce una fuerza perturbadora hacia delante); o por modificar la situación de la base de sustentación (por ejemplo, dando pasos).

Así, la estabilidad dependerá de tres tipos de condicionantes (McGinnis y Newell, 1982):

- Las propiedades de la superficie de apoyo
- Las propiedades del organismo

- Los objetivos de la tarea

Mayoritariamente, los estudios sobre estabilidad se han centrado en el mantenimiento de una postura, como la bipedestación. Cuando la fuerza peso se proyecta sobre la base de sustentación el sujeto se reequilibra instantáneamente, siempre y cuando la velocidad horizontal del centro de masas esté dentro de unos márgenes (Pai y Patton, 1997). Estos márgenes vendrán determinados por los condicionantes descritos anteriormente. Si se sobrepasan el organismo reaccionará para protegerse y reducir la velocidad total del cuerpo.

3.1.3- El salto vertical y la estabilidad

El mantenimiento de la estabilidad es un factor crítico en el deporte, y muy especialmente en la realización de saltos. En multitud de deportes, los atletas deben soportar perturbaciones producidas por el adversario o incluso por variaciones inesperadas de la superficie de apoyo (pista resbaladiza, líquido en el suelo...) justo en el momento en el que pretenden ejecutar un salto. Su capacidad para superar estas perturbaciones será determinante en su rendimiento.

En la tarea propuesta para nuestro estudio, el sujeto debía caer a la plataforma de fuerzas desde diferentes alturas y distancias para saltar posteriormente. Para poder realizar esta tarea, el centro de masas del sujeto debía tener una posición y una velocidad en el momento del aterrizaje que le permitiese mantenerse en la región de estabilidad, que será considerada un atractor del sistema. El salirse de los límites de esta región producirá un cambio cualitativo en el comportamiento postural del sujeto que impedirá la ejecución del salto, por lo que consideraremos a estos límites como separatrices. En el espacio fase habrá así unos límites que delimitarán una región en la cual el sujeto será capaz de superar las perturbaciones posturales, que será la cuenca del atractor, y una región fuera de estos límites en la que el sujeto no podrá superarlas. Si el sujeto consigue

posicionar su centro de masas dentro de la cuenca del atractor, el organismo acabará necesariamente verticalizándose, después de un periodo de estabilización. Durante este periodo, el organismo oscilará en los dos ejes horizontales del espacio hasta posicionar todo su cuerpo en el eje vertical. Si el centro de masas cae fuera de la cuenca, el organismo tenderá a la horizontalidad (caída). Normalmente, esta caída no se producirá, ya que el sujeto abandonará la posición especificada de los pies para saltar (pies juntos) y realizará acciones para evitar la caída aumentando o modificando la base de sustentación, como dar un paso (Pai y Patton, 1997; Aguado, 1993). La posición horizontal que se produciría si el sujeto cayese será otro estado atractor del sistema, pero el sujeto evitará consciente o inconscientemente el llegar a esta posición.

Así, se definen dos estados que atraen al sistema:

- El estado vertical: $\beta_x, \beta_y = (0, 0)$
- El estado horizontal: $\beta_x, \beta_y = (p/2, p/2)$

Para cada sujeto habrá unos ángulos críticos (β^c_x, β^c_y) que definirán la región en la que es sujeto es capaz de estabilizarse:

$$0 \leq \beta_x \leq \beta^c_x, \quad 0 \leq \beta_y \leq \beta^c_y$$

Las dimensiones de la región de estabilidad dependerán de cada sujeto, pero se denomina el cono de la estabilidad porque se asemeja a una forma cónica (McCollum y Leen, 1989). En la figura 59 se muestra la región de estabilidad y en la figura 60 el cono de la estabilidad.

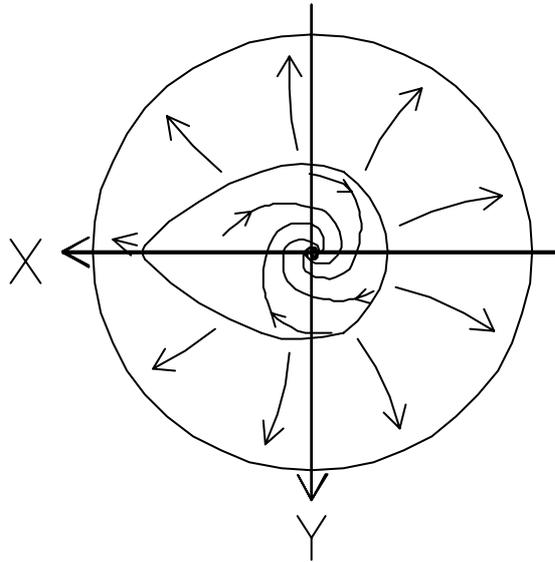


Fig. 59 Región de estabilidad. La zona central representa la cuenca del atractor en la que el sujeto tiende hacia la verticalidad (atractor del sistema). La línea que rodea dicha zona representa la separatriz. El círculo externo representa el otro estado que atrae al sistema, la horizontalidad.

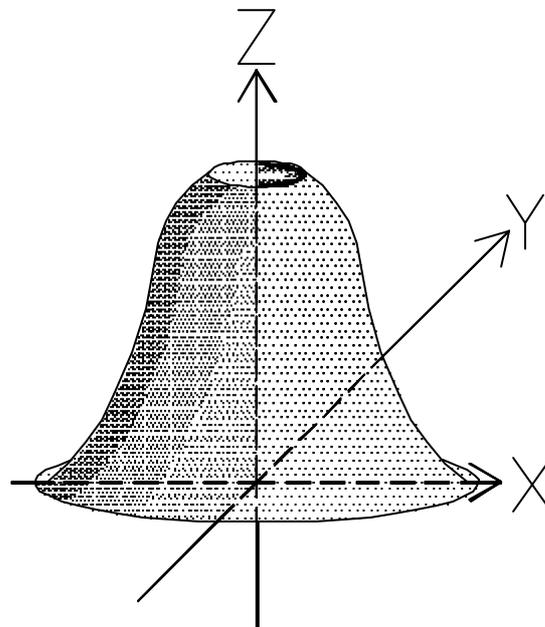


Fig. 60 Cono de la estabilidad. Este cono representa las mismas regiones que la anterior figura pero en tres dimensiones. La zona superior del cono representa la cuenca de atracción del atractor de la verticalidad, y el borde de dicha zona será la separatriz. La zona inferior del cono representa el atractor que lleva al sujeto a la horizontalidad.

En nuestro estudio, las características del sujeto y de la superficie no se modificaron, pero sí que se cambió la tarea, tal y como sucede en la mayor parte de las propuestas de entrenamiento. El objetivo final de todas las propuestas fue el saltar lo más alto posible, aunque en realidad este objetivo esconde la necesidad de mantener el equilibrio a pesar de las fuerzas que se generan. Ésta es una característica del estudio que lo diferencia claramente de la mayoría de investigaciones relacionadas con la estabilidad, ya que el objetivo principal de las tareas que éstos proponen se centra en mantener la estabilidad en sí.

Para estudiar la estabilidad de esta tarea se investigaron las fuerzas reactivas (cinética) sobre la superficie de apoyo. Probablemente hubiéramos obtenido resultados similares si se hubiese estudiado el movimiento del cuerpo (cinemática) o la actividad de los grupos musculares implicados (electromiografía –EMG-), pero las medidas obtenidas no serían tan precisas. Los registros con videocámara se realizan a una frecuencia mucho menor que la que podemos utilizar con la plataforma de fuerzas, y la EMG proporciona demasiado ruido.

Así, analizamos la aplicación de la fuerza sobre la superficie de apoyo por parte del organismo desestabilizándolo en el eje anteroposterior y en el eje vertical. En los saltos horizontales, el sujeto debía convertir el componente horizontal de la velocidad en vertical, como sucede en muchos saltos deportivos. En los saltos desde altura, el sujeto debía ser capaz de frenar la fuerza descendente para no caer. Nuestra hipótesis se centra en la forma en la que el organismo recupera esta posición óptima para saltar (verticalización). Si realmente el sujeto sigue los principios del comportamiento no lineal, se debían observar fluctuaciones en las series temporales de la fuerza que se incrementarían cuando nos acercásemos a los límites de la región de estabilidad, es decir, cuando nos acercásemos a la zona de transición entre dos atractores (el estado vertical y el horizontal). Si bien no podíamos analizar el cambio de estado entre los dos atractores debido a que hubiéramos puesto en peligro la integridad del sujeto (se debería provocar una fuerza suficientemente grande para provocar la caída

del sujeto e impedir los movimientos involuntarios para no caer), sí deberíamos poder observar el incremento de fluctuaciones críticas en la zona próxima a la transición.

El objetivo de este estudio es por tanto el de comparar cualitativamente las series temporales de la aplicación de la fuerza sobre una plataforma en el tiempo de contacto previo al salto cuando se modifican los condicionantes de la tarea y se aproxima al sujeto a una zona de transición. Con esta comparación se pretende estudiar también si la medida de las fluctuaciones y por tanto de la variabilidad de las series temporales es una medida significativa para valorar cualitativamente la ejecución de los saltos y el estado en el que se encuentra el sujeto con relación a dicha tarea.

3.2- Material y método

Se pretendía analizar el tiempo de contacto con una plataforma de fuerzas en la fase previa a un salto después de haber caído desde diferentes distancias y alturas. Denominaremos a la parte del estudio correspondiente a los saltos desde diferentes distancias estudio A, y a la parte del estudio correspondiente a los saltos desde diferentes alturas estudio B. Estos cambios producían series temporales de los diversos componentes de la fuerza aplicada muy distintas así como posiciones diferentes del cuerpo y del centro de gravedad durante el tiempo de contacto con la plataforma de fuerzas.

Se realizó otro estudio, que denominaremos estudio C, en el que se reprodujo el protocolo de los estudios A y B con otro grupo de población para valorar si las tendencias observadas se repetían.

3.2.1- Sujetos

Para la realización del estudio A y B, participaron voluntariamente 10 sujetos (6 hombres y 4 mujeres; Masa: $72,7 \pm 12,7$ Kg; Edad: $22,4 \pm 1,58$ años), todos

ellos estudiantes de ciencias del deporte de la Westfälische Wilhelms-Universität de Münster (Alemania). Los sujetos eran físicamente activos y practicaban diversos deportes una media de 7,2 (\pm 2,8) horas a la semana.

Para la realización del estudio C, participaron voluntariamente 9 sujetos (6 hombres y 3 mujeres; Masa: 70 \pm 11,8 Kg; Edad: 24,7 \pm 5,2 años), todos ellos deportistas de nivel internacional del Centro de Alto Rendimiento (CAR) de Sant Cugat.

3.2.2- Material

En los estudios A y B se utilizó una plataforma Kistler 9281B (400x600 mm) y se recogieron datos a una frecuencia de 10.000 HZ. La frecuencia natural vertical de la plataforma era de 800 HZ y estaba instalada siguiendo las recomendaciones del protocolo propuesto por Kistler.

Se utilizó también un amplificador 9851 de la señal para poder determinar los tres componentes Fx, Fy y Fz del vector de fuerza resultante y se ajustaron los factores de calibración para la fuerza que debíamos medir siguiendo también el protocolo de Kistler.

Para el estudio C, se utilizó una plataforma Kistler 9281C (400x600 mm), y se recogieron los datos a una frecuencia de 1000 HZ. La frecuencia natural vertical de la plataforma era de 1000 HZ y el software que se utilizó para poder determinar los tres componentes Fx, Fy y Fz del vector de fuerza resultante fue el Bioware.

3.2.3- Protocolo del estudio A- Saltos desde diferentes distancias

Todos los sujetos, que iban vestidos con ropa cómoda y calzado deportivo, realizaron un calentamiento previo consistente en carrera continua, estiramientos y saltos suaves.

Cada sujeto debía saltar desde una posición de pies juntos y manos en la cintura (véase fig. 61) para caer con pies juntos sobre la plataforma de fuerzas y saltar posteriormente de forma que consiguieran la máxima velocidad vertical en el despegue, ya que la altura del centro de gravedad dependerá de la velocidad vertical y de la posición del cuerpo durante la fase de vuelo. El tiempo de contacto debía ser el menor posible para cada sujeto y la posición de los brazos no tenía que variar durante todo el salto. Las distancias desde las que se saltó fueron 20, 60, 100, 140 y 180 cm (con la posibilidad de que algún sujeto no fuera capaz de saltar desde las distancias más grandes). Si no se producían errores en la ejecución en cuanto al seguimiento del protocolo, sólo se realizaba un intento para cada distancia. Los errores podían consistir en mover los brazos o caer con parte de un pie o de los dos fuera de la plataforma. En el caso de producirse algún error, se repetía el salto. El orden de ejecución de los saltos fue el siguiente: 20, 100, 180, 60 y 140 cm, descansando un mínimo de 2 minutos entre salto y salto.

Para valorar la repetitividad del test, los mismos sujetos repitieron todas las pruebas después de 72 horas.



Fig. 61 Posición inicial del test en el espacio en el que se realizaron los tests. Las marcas blancas en el suelo son las distancias desde las que los sujetos debían saltar.

3.2.4- Protocolo del estudio B: Saltos desde diferentes alturas

Realizaron este estudio los mismos sujetos del estudio A y a continuación de dicho estudio.

Cada sujeto debía dejarse caer desde un plinto sobre la plataforma de fuerzas desde una posición de partida de pies juntos y manos en la cintura y saltar posteriormente lo más alto posible (véase fig. 62). El plinto estaba situado a una distancia de 20 cm de la plataforma de fuerzas. El tiempo de contacto debía ser el menor posible para cada sujeto y la posición de los brazos no tenía que variar durante todo el salto. Las alturas desde las cuales se saltó fueron 25, 45, 65, 85 y 105 cm. El orden de ejecución fue 45, 85, 25, 65 y 105 cm, descansando un mínimo de 2 minutos entre salto y salto. Se

realizó un intento de cada salto a no ser que se produjera algún error en cuanto al seguimiento del protocolo. Los errores podían consistir en mover los brazos o en caer encima de la plataforma con parte de un pie, un pie o los dos pies fuera de ella. Si se producía algún error se repetía el salto.

Para valorar la repetitividad del test, los mismos sujetos repitieron todas las pruebas después de 72 horas.



Fig. 62 Posición inicial del test del estudio B.

3.2.5- Protocolo del Estudio C

Se realizaron los mismos tests que en los estudios A y B pero se modificaron ligeramente las alturas desde las que se saltaba debido a la utilización de otro material, un cajón de Bosco en lugar de un plinto. En este caso fueron 20, 40, 60,80 y 100 cm (véase fig. 63).

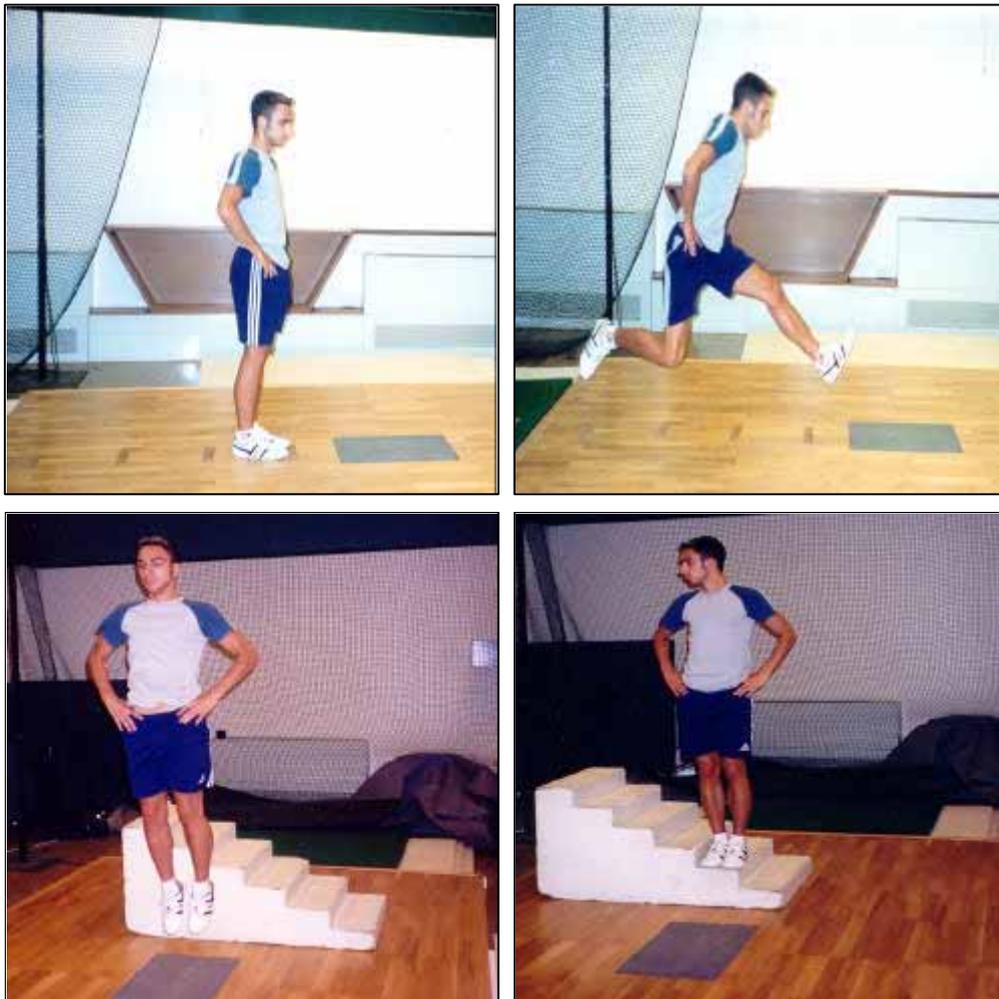


Fig. 63 Diferentes momentos de los tests del estudio C (Torrents et al., 2002).

3.2.6- Análisis de los datos

De cada salto, se analizaron las series temporales de los tres componentes de la fuerza durante el tiempo de contacto previo al salto transformando los valores obtenidos a Newtons (N). Posteriormente se transformaron estas series utilizando el análisis de Fourier para determinar las frecuencias que aparecían en las series temporales de la fuerza. Concretamente, se utilizó una transformación discreta de Fourier y se utilizó una ventana Hamming. El análisis de Fourier es un procedimiento matemático que describe las señales periódicas en términos de coeficientes armónicos y se utiliza frecuentemente en investigaciones biomecánicas en las que se valora las fuerzas de reacción sobre el suelo (Schneider y Chao, 1983). Este tipo de análisis facilita la comparación numérica de los datos obtenidos al discretizar las series temporales continuas en términos de coeficientes de Fourier.

Para comparar los diferentes saltos desde las diferentes alturas y distancias, se seleccionaron 5 franjas o rangos de frecuencias y se sumaron todos los valores obtenidos dentro de esas franjas. Para seleccionar estos valores se ha utilizado la información de la literatura relacionada con el temblor muscular (véase apartado 6.1 de la parte teórica), ya que en estos estudios es frecuente analizar las frecuencias observadas en dicho temblor en diferentes condiciones de fatiga o carga (Keidel y Keidel, 1989; Sandoni y Young, 1994; Vaillancourt y Newell, 2000; Vittasalo y Gajewsky, 1994). Las frecuencias menores de 4 HZ no se analizaron, ya que sólo podían corresponder al total del tiempo de contacto del sujeto con la plataforma, y las mayores de 120 HZ podrían confundirse con el ruido provocado por la propia plataforma. Entre estos dos valores, se seleccionaron para su análisis y comparación las franjas de 4 a 7 HZ, de 8 a 11 HZ, de 12 a 18 HZ, de 19 a 59 HZ y de 60 a 120 HZ. También se sumaron los valores obtenidos entre 4 y 18 HZ y entre 12 y 120 HZ. Se calculó la media de los valores obtenidos entre todos los sujetos de cada estudio.

Además, las series temporales se dividieron para su análisis en dos partes: el primer tercio de las series y el resto. Finalmente, se analizó la relación entre las medias de los valores de Fourier obtenidos con la altura o distancia desde la que se salta mediante el cálculo de la recta de regresión y la correlación entre ambas variables.

Las dos partes de las series temporales de los saltos de los estudios A y B se analizaron también mediante dos clusterings (uno para cada parte de las series temporales). Concretamente, se utilizó el método complete-link, y la distancia entre los diferentes saltos se calculó como la distancia euclídea entre los coeficientes de Fourier de cada caso normalizados a 1.

3.3- Resultados

3.3.1- Repetitividad del test (Estudios A y B)

Una vez transformadas las series temporales de la fuerza con la transformación de Fourier (FT) y cuantificadas las diferentes franjas de frecuencias, se compararon los valores obtenidos en el primer día de tests en los estudios A y B para cada tipo de salto y para cada franja con los obtenidos por el mismo sujeto en el segundo día de tests. Este proceso se realizó tanto con las series temporales completas como con las dos partes en las que se habían dividido. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) y comparando los resultados de los 10 sujetos se obtuvo un coeficiente de correlación para la serie completa de $r= 0,52$ ($p<0,01$). El primer tercio de las series mostró una mayor correlación ($r=0,59$; $p<0,01$), mientras que el resto de la serie mostró una correlación menor ($r=0,33$; $p<0,01$).

3.3.2- Estudio A: Saltos aumentando la distancia

Se analizaron todos los resultados obtenidos en el primer día de tests. En el estudio A, las medias de los valores de Fourier obtenidos en cada franja de

los 10 sujetos mostraron un comportamiento diferente en función de la parte de la serie temporal que se analizó y del eje en el que se aplicó la fuerza.

Las series completas de F_x mostraron una relación proporcional ($r > 0$) y un grado de asociación significativa ($p < 0,05$) entre las medias de los coeficientes de Fourier obtenidos por los sujetos y la distancia de salto en las franjas de altas frecuencias (19-59 HZ; 60-120 HZ; 12-120 HZ). Cuando únicamente se analizó el primer tercio de la serie temporal, la relación proporcional aumentó y se obtuvieron valores significativos en todas las franjas de frecuencias. Cuando se analizaron los dos segundos tercios de las series temporales de F_x , la relación volvió a ser menor y sólo fue significativa en la franja de mayor frecuencia (60-120 HZ; 12-120 HZ). Los coeficientes de Pearson de la correlación entre ambas variables se muestran en la tabla 7. En el anexo 2 se muestran las rectas de regresión de todas las franjas de frecuencias con su coeficiente de determinación (véase fig. a1-a3).

Las series completas de F_y mostraron resultados similares. Se dio una relación proporcional ($r > 0$) y un grado de asociación significativa ($p < 0,05$) entre las medias de los coeficientes de Fourier obtenidos por los sujetos y la distancia de salto en las franjas de altas frecuencias (19-59 HZ; 60-120 HZ). Cuando únicamente se analizó el primer tercio de la serie temporal, la relación proporcional aumentó y se obtuvieron valores significativos en todas las franjas de frecuencias. Cuando se analizaron los dos segundos tercios de las series temporales de F_y , la relación volvió a ser menor y sólo fue significativa en la franja de mayor frecuencia y, en este caso, también en la de menor frecuencia (4-7 HZ; 60-120 HZ). Los coeficientes de Pearson de la correlación entre ambas variables se muestran en la tabla 7. En el anexo 2 se muestran las rectas de regresión de todas las franjas de frecuencias con su coeficiente de determinación (véase fig a4-a6).

Las series completas de F_z mostraron resultados muy distintos. Se dieron incluso relaciones inversamente proporcionales ($r < 0$) y la mayoría no fueron significativas. Los coeficientes de Pearson de estas asociaciones se

muestran en la tabla 7. En el anexo 2 se muestran las rectas de regresión de todas las franjas de frecuencias con su coeficiente de determinación (véase fig a7-a9).

Se observaron también las series temporales individuales de cada sujeto y éstas mostraron un aumento de las fluctuaciones en su parte inicial especialmente en los dos componentes horizontales. Para ilustrar esta afirmación, se muestran las series temporales de la fuerza de todos los saltos realizados por un sujeto representativo de este fenómeno (véase fig. 64, 65 y 66). En el anexo 2 se presentan las series temporales del resto de los sujetos (véase fig. a10-a36).

En la figura 64 se observa como las fluctuaciones en las series temporales de F_x aumentan en número y en amplitud a medida que aumenta la distancia desde la que se salta. La F_x corresponde a la fuerza mediolateral, y las fluctuaciones aparecen en la primera fase del tiempo de contacto, aproximadamente en el primer tercio. El sujeto pasará por el eje vertical perpendicular a la superficie de apoyo repetidas veces hasta que prácticamente se verticaliza siguiendo un patrón similar en todos los saltos una vez pasado el periodo de fluctuaciones.

Las series temporales de la F_y (véase fig. 65), es decir, la fuerza anteroposterior, no muestra tan claramente un aumento en el número de fluctuaciones, pero sí que se observa un aumento en la amplitud de éstas. Las fluctuaciones también se dan en la primera fase de la serie temporal. Una vez las fluctuaciones han disminuido, el patrón de la serie es muy similar en todos los saltos. El momento de fuerza hacia delante que se genera al caer es frenado por el sujeto que busca verticalizarse, pasando por el eje vertical aproximadamente 30 ms antes del despegue, para volver a éste en el momento de perder el contacto con la plataforma.

Las series temporales de la F_z o fuerza vertical (véase fig. 66) muestran los dos picos descritos por Fowler y Less (1998) en todos los saltos, aunque se producen ambos en los primeros 40 ms del tiempo de contacto con la

plataforma. En el último salto (d180), es decir, en el más inestable, se produce un tercer pico muy evidente entre los dos que se daban de la misma amplitud y de una frecuencia similar. El patrón de la serie temporal posterior al periodo de fluctuaciones es similar en todos los saltos, a excepción del último, en el que disminuye la amplitud de la curva, incluso comparándola con el primer salto, pero se aplica la fuerza durante más tiempo.

TABLA 7 Coeficientes de Pearson de la asociación lineal entre la distancia de salto y la media de los valores de Fourier obtenidos de las series temporales de los tres componentes de la fuerza para cada franja de frecuencias del estudio A, tanto para las series completas como para los dos partes en las que se han dividido

Fx	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	---	0,96***	---
8-11 HZ	---	0,91**	---
12-18 HZ	---	0,78*	---
19-59 HZ	0,78*	0,88**	---
60-120 HZ	0,94**	0,98***	0,96***
4-18 HZ	---	0,90**	---
12-120 HZ	0,85*	0,95***	0,80*

Fy	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	---	0,98***	0,93**
8-11 HZ	---	0,99***	---
12-18 HZ	---	0,96***	---
19-59 HZ	0,85*	0,94**	0,88**
60-120 HZ	0,93**	0,92**	0,96***
4-18 HZ	---	0,99***	---
12-120 HZ	---	0,95***	---

Fz	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	-0,85*	0,95***	-0,92**
8-11 HZ	---	---	---
12-18 HZ	---	---	---
19-59 HZ	---	---	---
60-120 HZ	0,96***	---	---
4-18 HZ	-0,76*	---	-0,80*
12-120 HZ	0,83*	---	---

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

Fx: Componente mediolateral de la fuerza; Fy: Componente anteroposterior de la fuerza; Fz: Componente vertical de la fuerza; r: r de Pearson;

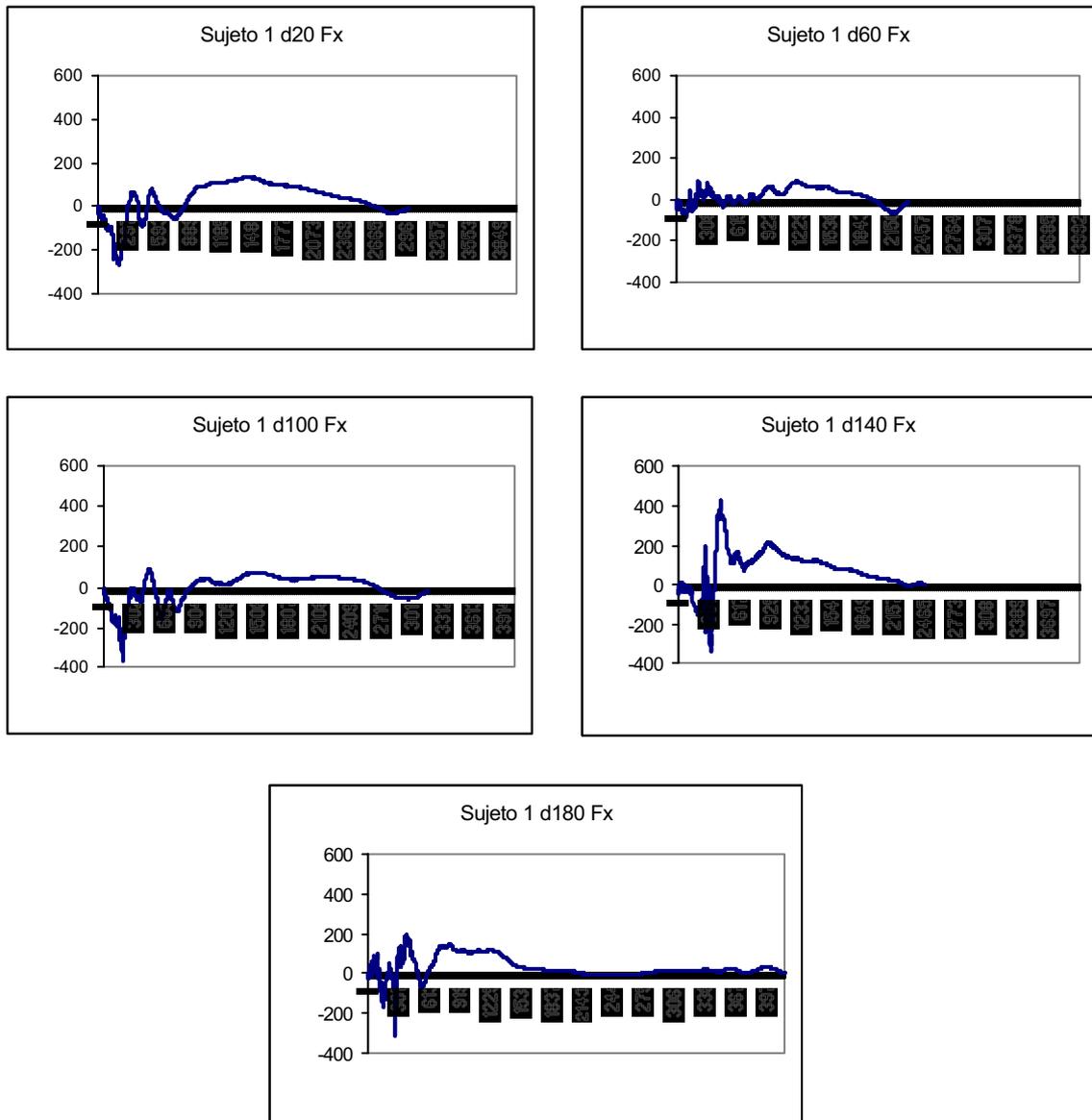


Fig. 64 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 1 en los saltos del estudio A.

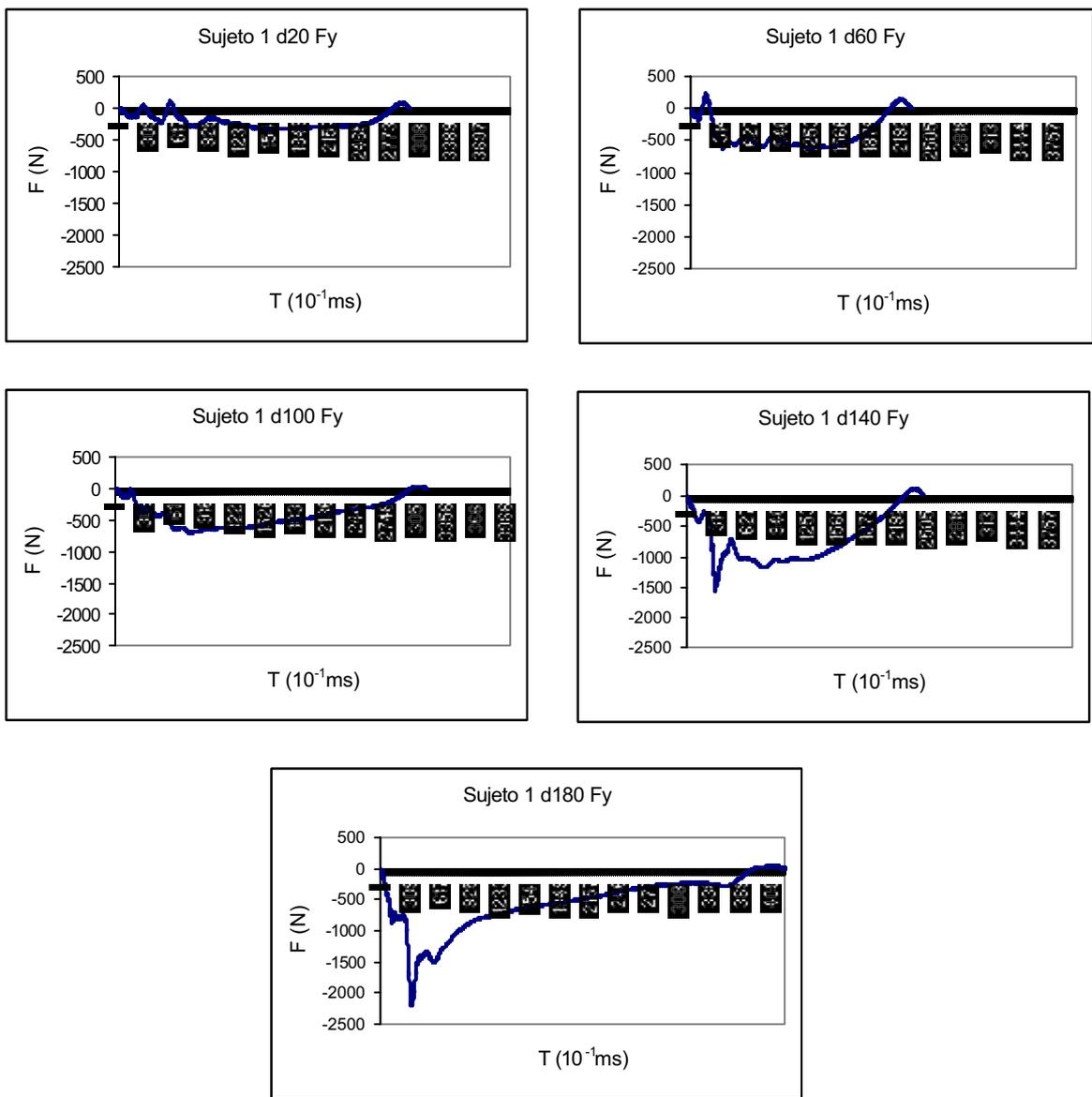


Fig. 65 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 1 en los saltos del estudio A.

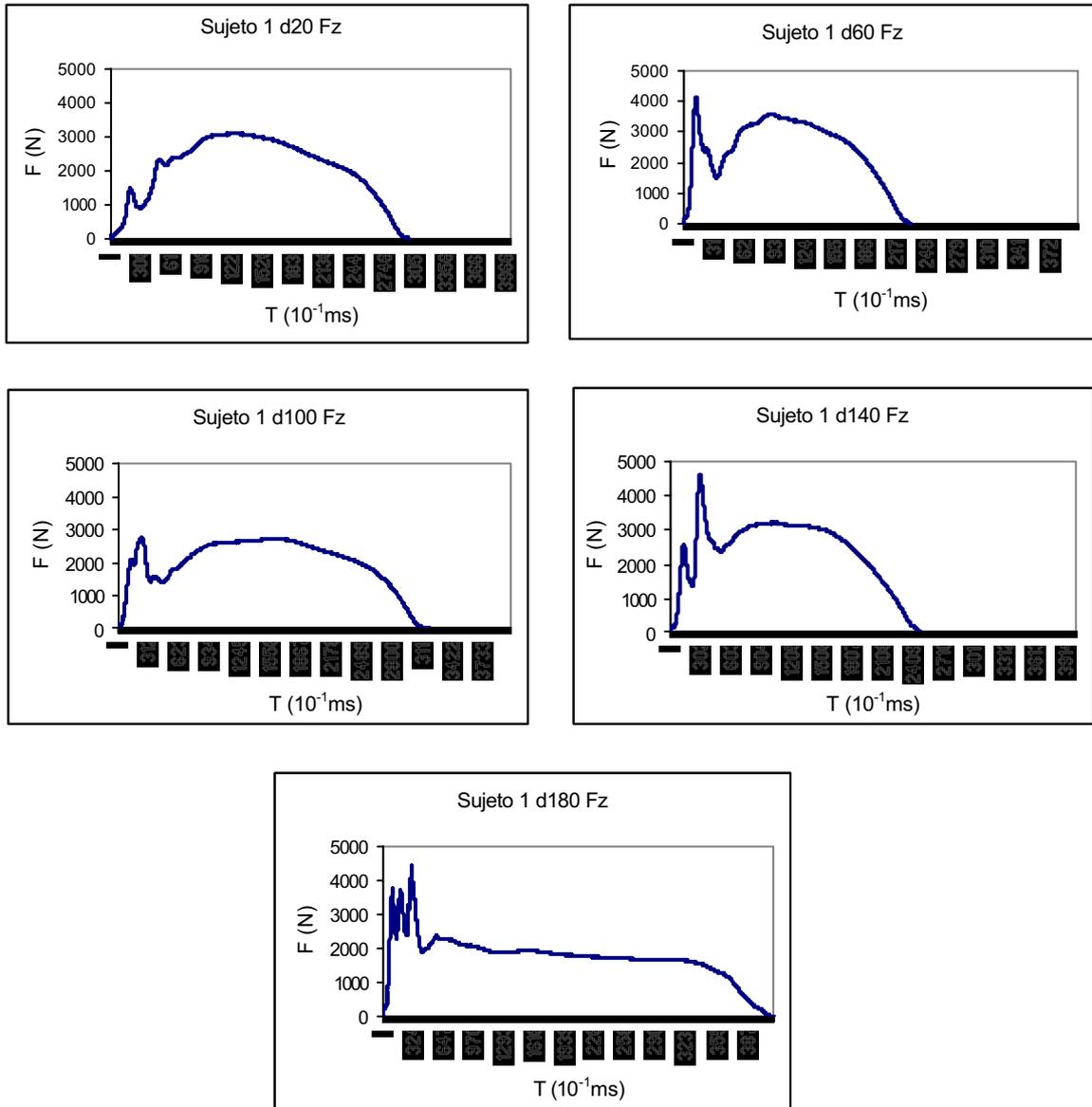


Fig. 66 Series temporales del componente vertical de la fuerza (F_z) del sujeto 1 en los saltos del estudio A.

3.3.3- Estudio B: Saltos aumentando la altura

La media de los valores de Fourier obtenidos en cada franja de los 10 sujetos del primer estudio también mostró resultados diferentes en función de la parte de la serie temporal que se analizó y del eje en el que se aplicó la fuerza.

Las series completas de F_x no mostraron una relación proporcional entre las medias de los coeficientes de Fourier obtenidos por los sujetos y la altura de salto. Cuando se analizó el primer tercio, en cambio, se observó una relación proporcional ($r > 0$) y un grado de asociación significativa ($p < 0,05$) en todas las franjas de frecuencias. Cuando se analizaron los dos segundos tercios se dieron incluso relaciones inversamente proporcionales en las franjas de 8-11 HZ, 19-59 HZ y 12-120 HZ. Los coeficientes de Pearson de la correlación entre ambas variables se muestran en la tabla 8.

Las relaciones que se dieron entre la altura de salto y los valores de Fourier obtenidos en F_y son muy distintos en función de la franja de frecuencias analizadas. En cambio, cuando se analizó el primer tercio de las series temporales de la aplicación de la fuerza, se dio una relación proporcional ($r > 0$) muy elevada en todas las franjas de frecuencias. Cuando se analizaron los dos últimos tercios se observó una relación inversamente proporcional ($r < 0$) en todas las franjas de frecuencias excepto en la de 19-59 HZ.

Los resultados del análisis de las series temporales de F_z mostraron resultados muy similares a los obtenidos en F_y , tal y como se puede observar en la tabla 8.

En el anexo 2 se muestran también todas las rectas de regresión con su coeficiente de determinación obtenidas de las medias de los valores de Fourier de todas las franjas de frecuencias de los tres componentes de la fuerza y para todas las partes de las series temporales (véase fig.a37-a45).

Aquí también se observaron las series temporales individuales de cada sujeto y mostraron un aumento de las fluctuaciones en su parte inicial. Para ilustrar esta afirmación, se muestran las series temporales de la fuerza de todos los saltos realizados por el mismo sujeto representativo del estudio A (véase fig. 67, 68 y 69). En el anexo 2 se muestran los resultados de los otros sujetos (véase fig. a46- a72).

En la figura 67 se observa como la forma de la serie temporal del componente x de la fuerza en este tipo de saltos es similar al que se daba en los saltos aumentando la distancia desde la que se saltaba. Hay una primera fase de una duración aproximada de 100 ms en la que se producen fluctuaciones y una gran variabilidad de la serie y posteriormente, cuando el sujeto ha conseguido estabilizarse, estas fluctuaciones cesan o se realizan a una frecuencia mucho menor y el valor de la fuerza se aproxima a 0, es decir, el sujeto se verticaliza.

Las series temporales de la F_y (véase fig. 68) muestran un comportamiento muy distinto al observado en los saltos aumentando la distancia. Inicialmente el sujeto se desequilibra ligeramente hacia delante debido probablemente a los 20 cm de distancia que separaba el plinto de la plataforma, pero al recuperarse después de aproximadamente 100 ms de contactar con el suelo la fuerza aplicada es prácticamente igual a 0 hasta que el sujeto despegue de la plataforma. En los primeros 100 ms es donde se observa un aumento en la amplitud de las fluctuaciones. El patrón de las series temporales es muy similar en todos los intentos, y no parece que haya un aumento claro en el número de fluctuaciones.

Las series temporales de la F_z o fuerza vertical (véase fig. 69) muestran los dos picos descritos por Fowler y Less (1998) en todos los saltos, aunque aquí también se producen en un tiempo más breve que el citado por ellos (50 ms aproximadamente). Tal y como pasa en el componente anteroposterior, el patrón de la serie temporal es muy similar en todas las alturas, y la variabilidad se produce principalmente en la primera fase, en la que se producen las fluctuaciones.

TABLA 8 Coeficientes de Pearson de la asociación lineal entre la altura de salto y la media de los valores de Fourier obtenidos de las series temporales de los tres componentes de la fuerza para cada franja de frecuencias del estudio A, tanto para las series completas como para los dos partes en las que se han dividido

Fx	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	---	0,91**	---
8-11 HZ	---	0,93**	-0,75*
12-18 HZ	---	0,93**	---
19-59 HZ	---	0,85*	-0,78*
60-120 HZ	---	0,80*	---
4-18 HZ	---	0,94**	---
12-120 HZ	---	0,92**	-0,82*

Fy	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	-0,95***	0,87**	-0,98***
8-11 HZ	---	0,94**	-0,96***
12-18 HZ	---	0,98***	-0,76*
19-59 HZ	0,83*	0,99***	---
60-120 HZ	0,98***	0,97***	-0,84*
4-18 HZ	---	0,95***	-0,98***
12-120 HZ	0,86*	0,99***	-0,82*

Fz	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	-0,98***	0,93**	-0,97***
8-11 HZ	---	---	-0,98***
12-18 HZ	---	0,85*	-0,96***
19-59 HZ	0,97***	0,99***	-0,98***
60-120 HZ	0,98***	0,98***	-0,98***
4-18 HZ	-0,98***	0,88**	-0,98***
12-120 HZ	0,91**	0,99***	-0,98***

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Fx: Componente mediolateral de la fuerza; Fy: Componente anteroposterior de la fuerza; Fz: Componente vertical de la fuerza; r: r de Pearson;

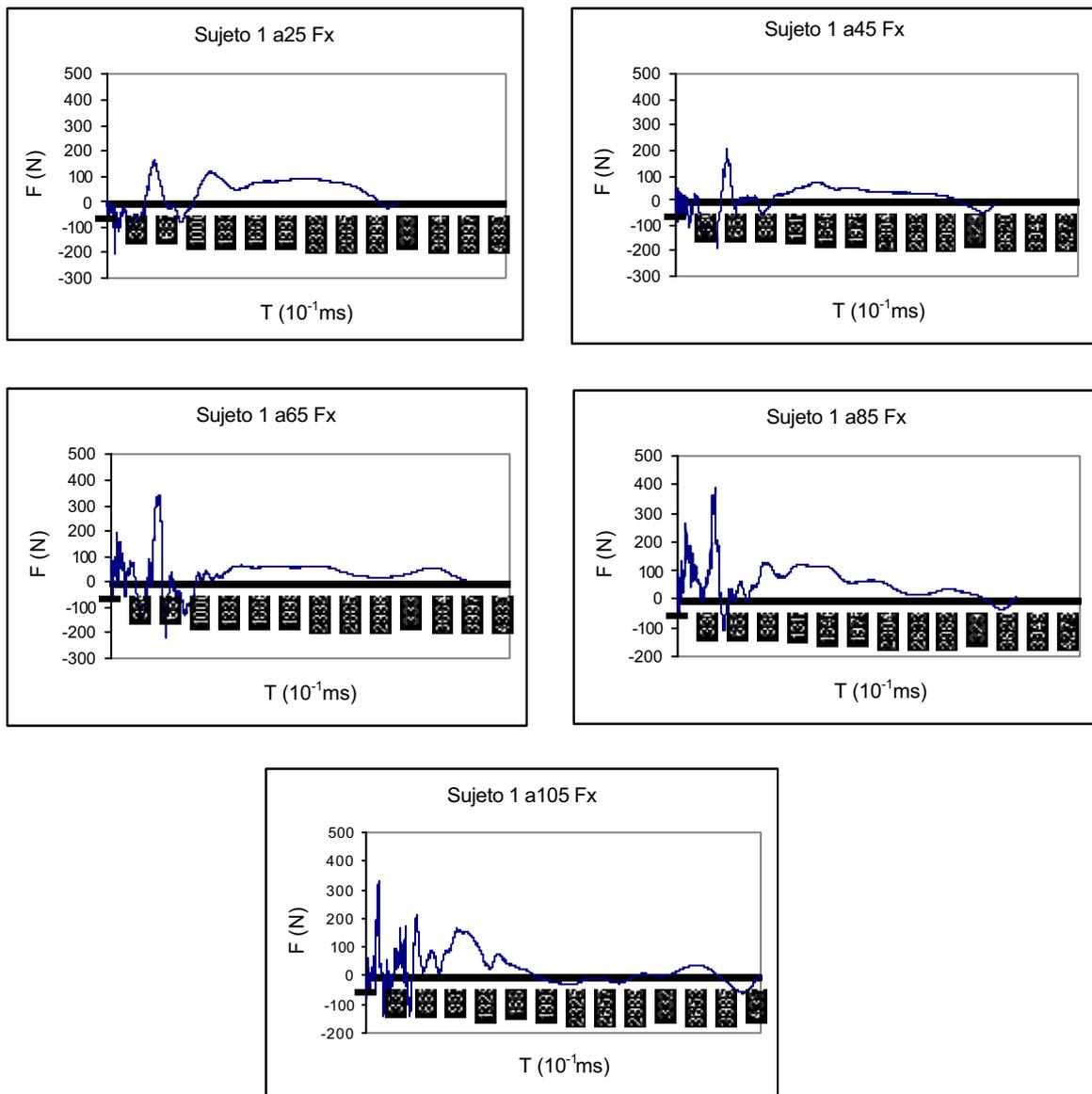


Fig. 67 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 1 en los saltos del estudio B.

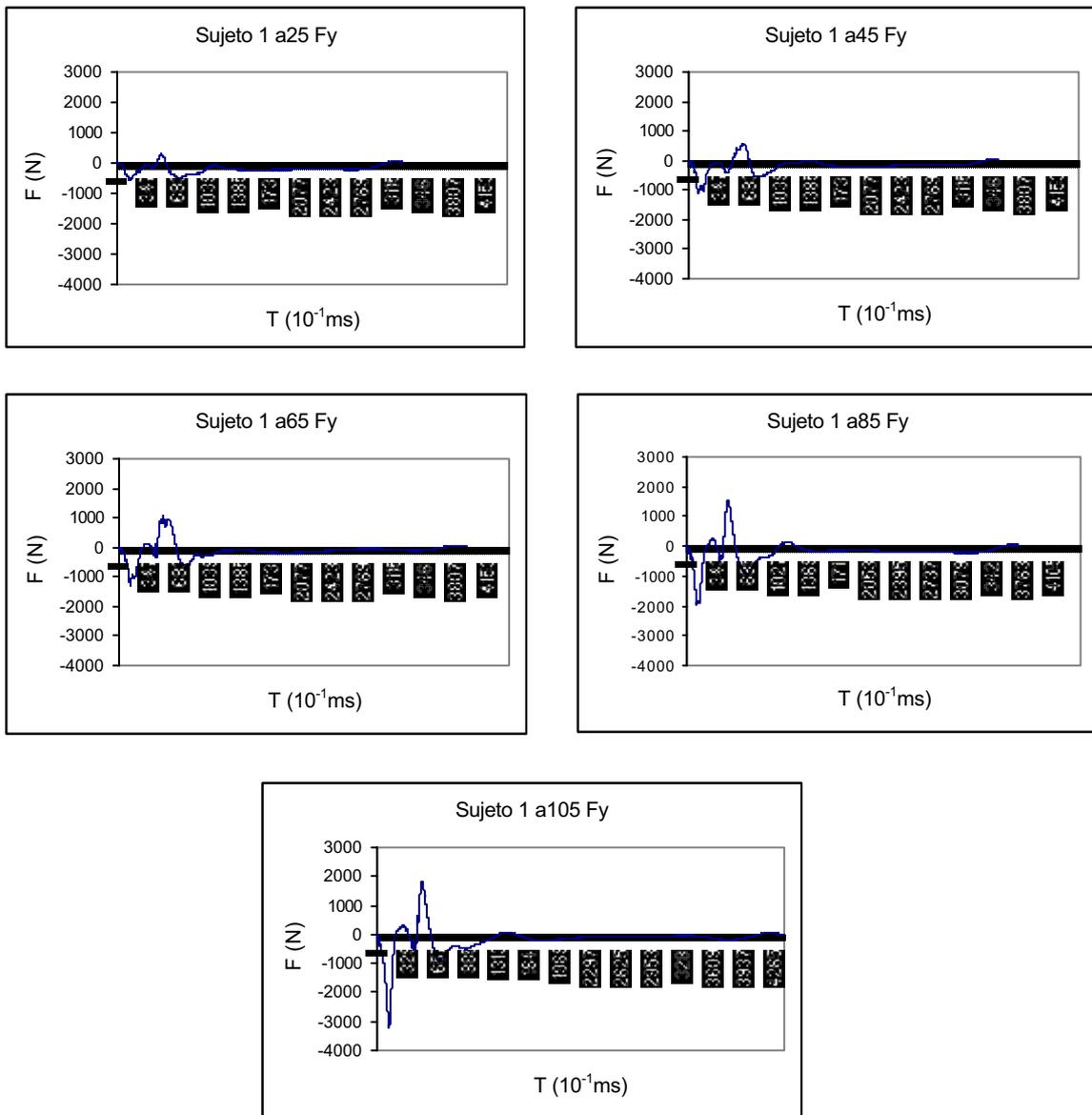


Fig. 68 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 1 en los saltos del estudio B.

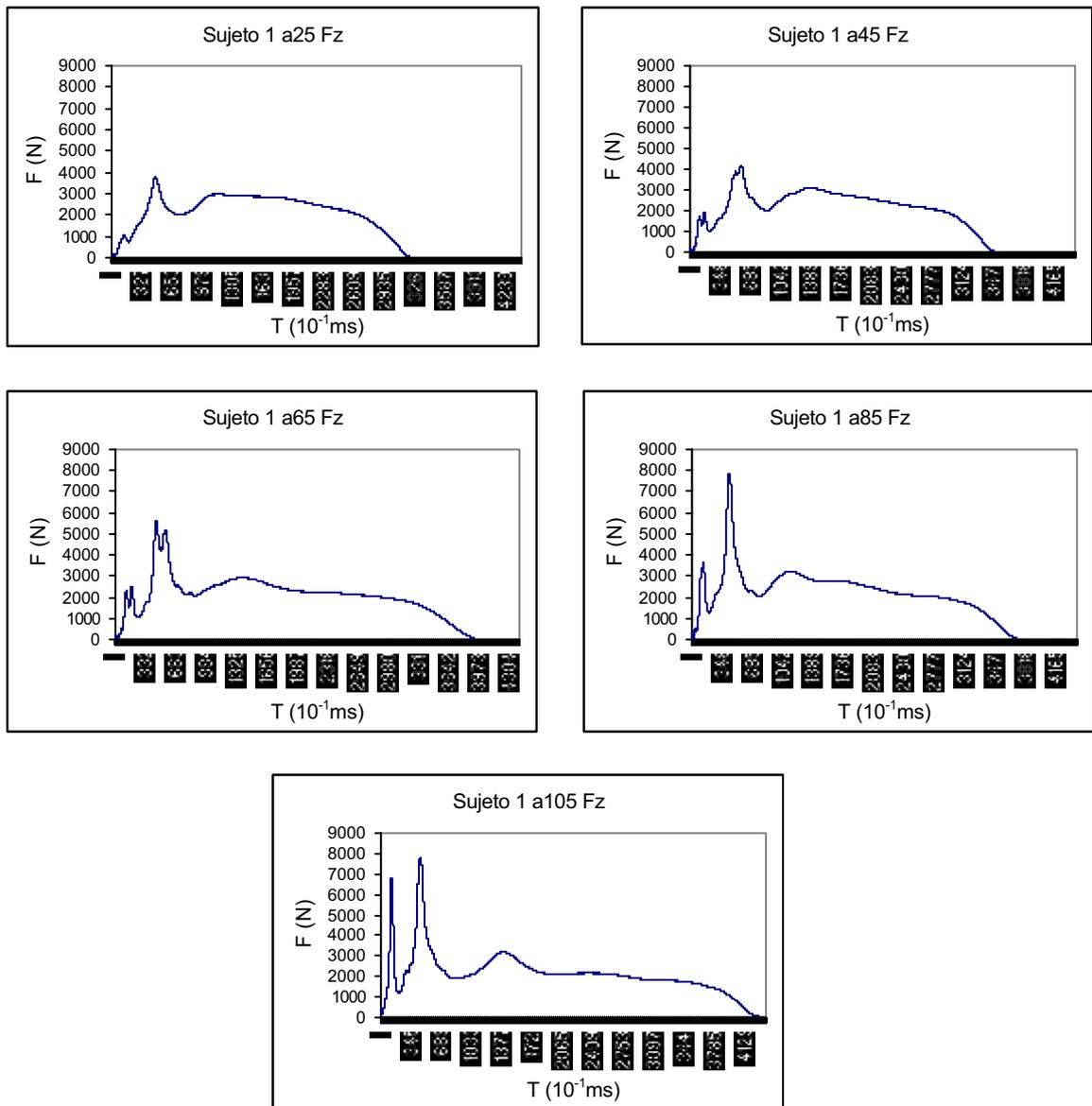


Fig. 69 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 1 en los saltos del estudio B.

3.3.4- Clustering de los estudios A y B

Después de dividir las series temporales en dos partes (el primer tercio y el resto de la serie) y realizar el análisis de Fourier, se clasificaron los saltos de ambos estudios de todos los sujetos mediante un clustering utilizando el método complete-link. La clasificación no permitió observar una agrupación evidente por sujetos o por tipo de saltos, aunque probablemente para que esto hubiese sucedido se hubiera precisado la realización de muchos más intentos del mismo tipo de salto. En cambio, sí que se observó una diferencia clara entre el clustering del primer tercio de las series temporales y el del resto. En el primer caso la distancia euclídea entre los diferentes experimentos fue significativamente mayor que en el segundo caso, tal y como puede observarse en las figuras 70 y 71. Esta diferencia se traduce en que el primer tercio de las series temporales presenta mucha más variabilidad que los dos tercios finales.

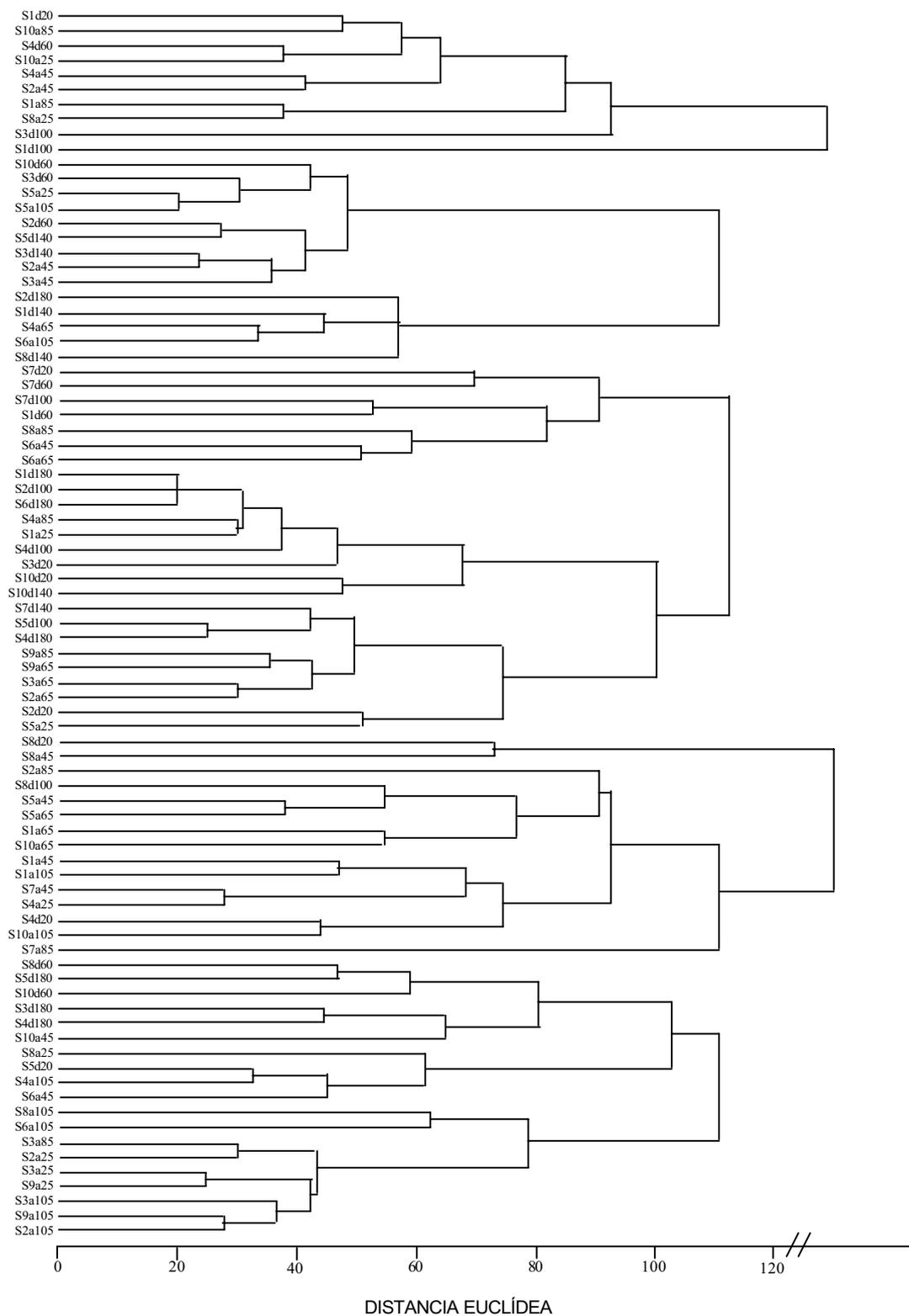


Fig. 70 Dendrograma del análisis por cluster del primer tercio de las series temporales de todos los saltos de los estudios A y B.

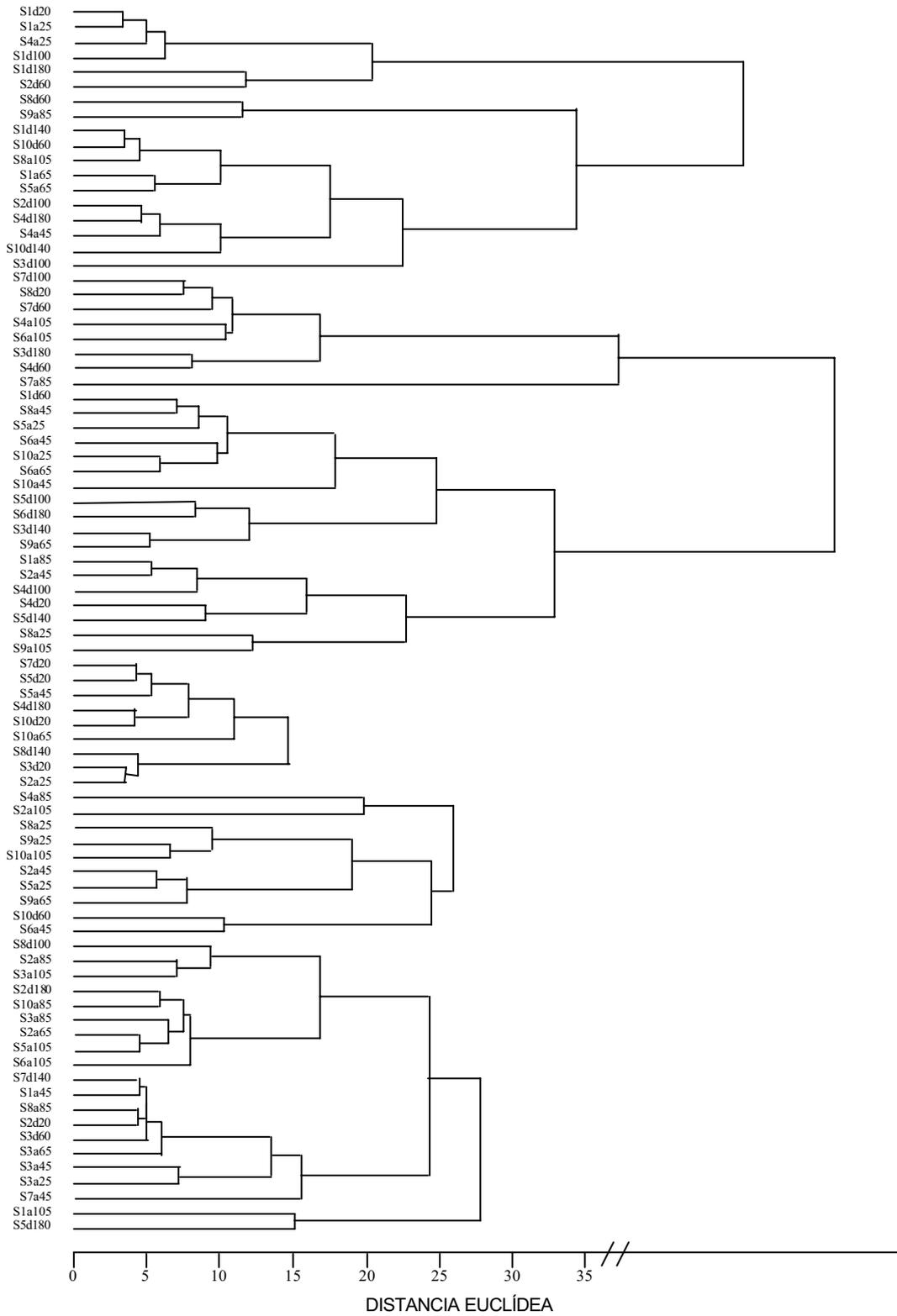


Fig. 71 Dendrograma del análisis por cluster de los dos tercios finales de las series temporales de todos los saltos de los estudios A y B.

3.3.5- Estudio C: Repetición de los estudios A y B con otro grupo de población

En el estudio C, la media de los 9 sujetos de los valores de Fourier obtenidos en cada franja y en cada parte de la serie temporal de la aplicación de la fuerza mostraron resultados muy similares a los obtenidos en el estudio A y B.

En la tabla 9 se resumen los resultados de los saltos desde diferentes distancias mostrando el coeficiente de Pearson de la asociación lineal entre los valores de Fourier y la distancia de salto tanto de las series temporales completas como de las dos partes en las que se han dividido.

En la tabla 10 se resumen los mismos resultados pero de los saltos desde diferentes alturas.

TABLA 9 Coeficiente de Pearson de la asociación lineal entre la distancia de salto y las medias de los valores de Fourier obtenidos de las series temporales de cada componente de la fuerza en cada franja de frecuencias en función de la distancia de salto en el estudio C, tanto para las series completas como para los dos partes en las que se han dividido

Fx	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	---	0,84*	---
8-11 HZ	0,93**	---	-0,72*
12-18 HZ	0,86*	---	---
19-59 HZ	---	0,92**	---
60-120 HZ	---	0,98***	---
4-18 HZ	0,87*	---	---
12-120 HZ	---	0,92**	---

Fy	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	-0,83*	0,98***	-0,86**
8-11 HZ	-0,75*	0,88**	-0,90**
12-18 HZ	-0,93**	0,88**	---
19-59 HZ	---	---	0,88***
60-120 HZ	---	0,77*	0,92**
4-18 HZ	-0,87**	0,94**	-0,88**
12-120 HZ	---	0,76*	---

Fz	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	-0,99***	0,93***	-0,97***
8-11 HZ	-0,97***	---	-0,99***
12-18 HZ	-0,86*	-0,91**	-0,88**
19-59 HZ	---	---	-0,92**
60-120 HZ	---	---	-0,97***
4-18 HZ	-0,99***	---	-0,98***
12-120 HZ	---	---	-0,91**

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

Fx: Componente mediolateral de la fuerza; Fy: Componente anteroposterior de la fuerza; Fz: Componente vertical de la fuerza; r: r de Pearson;

TABLA 10 Coeficiente de Pearson de la asociación lineal entre la altura de salto y las medias de los valores de Fourier obtenidos de las series temporales de cada componente de la fuerza en cada franja de frecuencias en función de la altura de salto en el estudio C, tanto para las series completas como para los dos partes en las que se han dividido

Fx	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	---	0,98***	---
8-11 HZ	---	0,99***	---
12-18 HZ	---	0,99***	-0,98***
19-59 HZ	0,84*	0,95***	---
60-120 HZ	0,95***	0,90**	---
4-18 HZ	---	0,95***	---
12-120 HZ	0,88**	0,95***	-0,84**

Fy	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	-0,99***	0,96***	-0,96***
8-11 HZ	---	0,95***	-0,97***
12-18 HZ	0,91**	0,96***	-0,96***
19-59 HZ	0,86**	0,99***	---
60-120 HZ	0,93**	0,94**	---
4-18 HZ	---	0,95***	-0,98***
12-120 HZ	0,89**	0,98***	-0,90**

Fz	r serie completa	r 1er tercio	r 2 tercios finales
4-7 HZ	-0,95***	0,96***	-0,92**
8-11 HZ	-0,94**	0,83*	-0,98***
12-18 HZ	---	0,93**	-0,92**
19-59 HZ	0,89**	0,98***	-0,84*
60-120 HZ	0,93***	0,93**	---
4-18 HZ	-0,95***	0,93**	-0,96***
12-120 HZ	0,85*	0,97***	-0,97***

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

Fx: Componente mediolateral de la fuerza; Fy: Componente anteroposterior de la fuerza; Fz: Componente vertical de la fuerza; r: r de Pearson;

3.4- Discusión

Los resultados del test-retest muestran como la medida de la amplitud de las frecuencias que aparecen en las series temporales de la fuerza sobre la plataforma de contactos es repetible significativamente ($p < 0,01$) en un 59% de los casos cuando se analiza el primer tercio de dichas series. Este porcentaje disminuye considerablemente cuando se analiza el resto de las series temporales (33%; $p < 0,01$), lo que nos indica que el interés de analizar esta variable se justifica especialmente en la primera parte del contacto con el suelo en este tipo de saltos. Este interés también queda enfatizado por los resultados del clustering. El primer tercio de las series temporales es la fase del tiempo de contacto con el suelo que presenta una mayor variabilidad.

Cuando se aumenta la distancia desde la cual el sujeto salta para caer encima de la plataforma e impulsarse seguidamente para saltar lo más alto posible, la fuerza aplicada aumenta para poder frenar el momento de fuerza anteroposterior generado. Al analizar las series temporales de los tres componentes (F_x , F_y y F_z) de dicha fuerza aplicada sobre la plataforma, se observa que se produjo una primera fase de alta variabilidad en la que la señal obtenida fluctuó reiteradamente hasta que se estabilizó siguiendo un patrón similar en todos los saltos. Esta primera fase de alta variabilidad también ha sido observada por Hamill et al., (1999) en la fase de contacto con el suelo del pie en la carrera. Estos autores analizaron la trayectoria de la fase relativa continua entre los ángulos de flexión de las dos rodillas, y observaron que el periodo con mayor variabilidad de toda la fase de apoyo era el comprendido entre el primer momento de contacto del pie con el suelo y el momento en el que el pie llegaba a la posición neutral. En nuestro estudio también se observó una primera fase en la que las fluctuaciones aumentaron a medida que aumentábamos la distancia de salto, especialmente en los componentes horizontales, tanto en el número como en la amplitud.

El análisis de Fourier confirma esta observación al analizar la amplitud de las frecuencias que aparecieron en el primer tercio de las series temporales de

la aplicación de la fuerza. Los valores obtenidos aumentaron con la distancia del salto en los dos ejes horizontales, mostrando una correlación muy alta y significativa especialmente en el eje anteroposterior.

En cambio, no se observa relación entre la distancia de salto y las frecuencias que aparecieron en los dos segundos tercios de la serie temporal.

De la misma forma, se observó que la distancia euclídea entre los resultados de Fourier de los diferentes saltos del mismo sujeto y entre los diferentes sujetos extraída del análisis por cluster es mucho mayor en el primer tercio del tiempo de contacto que en el resto.

Este análisis sugiere que el sujeto, al caer sobre la plataforma, fluctúa con movimientos horizontales hasta posicionarse sobre el eje vertical. La observación de las series temporales de los sujetos sugiere que estas fluctuaciones son de mayor amplitud a medida que aumentamos la distancia de salto, y, en el caso del componente mediolateral, también aumenta el número de fluctuaciones que aparecen. La fuerza horizontal resultante seguirá aproximadamente una trayectoria similar a la que se muestra en la figura 72, y su amplitud y frecuencia dependerá de la distancia desde la que se salte.

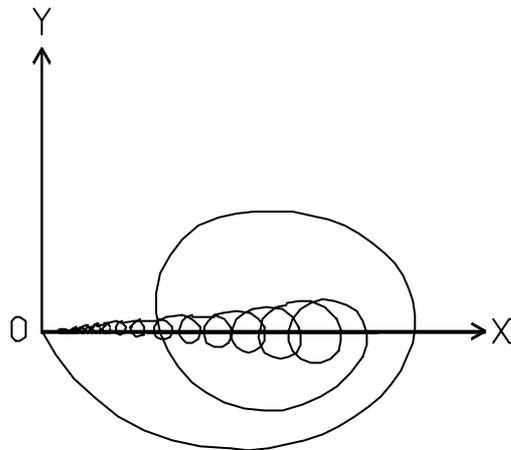


Fig. 70 Representación de la serie temporal de la aplicación horizontal de la fuerza durante la fase de contacto con el suelo previa al salto.

En el componente vertical se dieron los picos de fuerza observados en la literatura cuando se realizan drop jumps (Fowler y Less, 1998), aunque en este caso parecieron producirse a una frecuencia mayor. A medida que aumentamos la distancia de salto, la forma de la serie se modificaba y aparecieron más picos de fuerza. No obstante, en ese caso los coeficientes de Fourier no mostraron una relación significativa entre la amplitud de las frecuencias observadas y la distancia de salto.

Esta forma natural de aumentar el momento de fuerza lleva al sujeto a una situación límite, pero nunca podremos observar el cambio de patrón debido a que el sujeto no puede generar un momento mayor ya que no llega a la plataforma saltando desde más lejos. Probablemente, si hubiéramos impulsado al sujeto artificialmente hacia delante antes de saltar hubiera sido posible observar un aumento crítico de las fluctuaciones en la zona de transición de un estado atractor (verticalizarse para poder saltar) a otro (caer o realizar algún mecanismo de seguridad, como dar un paso hacia delante). La tarea propuesta en este estudio es mucho más compleja que las tareas de coordinación bimanual características de los primeros estudios sobre la aplicación de la TSD al estudio del movimiento humano, ya que tiene muchos más grados de libertad. Las transiciones claras de movimientos en

fase a movimientos antifase al aumentar la frecuencia no se dan en tareas con más grados de libertad, como es el caso del balanceo de un péndulo utilizando los músculos abductores y aductores de las muñecas. En esta tarea, al aumentar la frecuencia se activan los flexores y extensores de la muñeca y el movimiento se transforma en esférico, evitando así la transición a un movimiento en coordinación antifase (Kelso, 1998). El reclutamiento y/o la supresión de grados de libertad puede cambiar la dinámica, tal y como sucede en la forma de organización del organismo para evitar una caída. No obstante, sí que se observó que la estabilidad disminuía a medida que nos acercábamos a la zona de transición, tal y como sucedía en los estudios de movimientos cíclicos (Carson et al., 1995; Kelso, 1999), indicando que la transición a un nuevo patrón está precedida por un periodo de exploración de nuevas soluciones de gran variabilidad, tal y como propone la TSD.

Esta variabilidad es probablemente necesaria para evitar que el sujeto se lesione al caer, ya que el organismo necesita flexibilidad para adaptarse a los diferentes tipos de recepciones e impulsos. Newell et al. (1993) observaron como sujetos afectados con patologías relacionadas con el movimiento presentaban un control postural, valorado mediante el análisis de la trayectoria de la presión del centro del pie, menos variable que los sujetos sanos. Van Emmerik y Wagenaar (1996) también observaron que sujetos afectados de Parkinson mostraban una mayor rigidez del tronco durante la locomoción que los sujetos sanos. Éstos modificaban la relación entre la pelvis y el tórax en función de la velocidad de locomoción para aumentar la estabilidad y evitar rotaciones excesivas del cuerpo. En cambio, en los sujetos afectados de Parkinson no se observaba esta transición, presentando una menor variabilidad de los patrones coordinativos. Selles et al. (2001) detectaron el mismo fenómeno al comparar sujetos sanos con sujetos afectados de dolor de la zona lumbar de la espalda, mostrando estos últimos patrones de hiperestabilidad. De forma similar, Hamill et al. (1999) observaron como sujetos con lesiones del tren inferior mostraban mientras corrían una menor variabilidad que sujetos sanos en la trayectoria de la fase relativa entre el ángulo de flexión de las rodillas. Es probable que los sujetos lesionados minimicen la variabilidad en la forma de moverse para evitar el

dolor, pero esta falta de variación puede empeorar la situación por el constante estrés repetitivo que se somete a las articulaciones y demás estructuras del sistema músculoesquelético. En los tests de salto descritos en este estudio también se podría observar este fenómeno si analizásemos los saltos de sujetos con lesiones. Quizá se observaría una mayor rigidez en la primera fase del contacto con el suelo debido al intento de los sujetos de bloquear las articulaciones y minimizar el dolor.

Después de la primera fase de alta variabilidad, se observó que cada sujeto seguía un patrón muy similar al suyo y al de los otros sujetos en la aplicación de la fuerza aunque cambiasen las condiciones de caída. Los sujetos siguen un patrón coordinativo estable y variable a la vez. A pesar de las perturbaciones, los sujetos son estables, pero a la vez son variables para poder adaptarse, tal y como sucede en otros patrones de coordinación motriz como estar de pie o caminar (Riley y Turvey, 2002).

Aunque no se observó un cambio global en el patrón de esta fase de salto, es posible que sí que hubiéramos observado algún tipo de transición si hubiéramos analizado la coordinación entre las diferentes partes del cuerpo al ejecutar la tarea. Stergiou et al. (2001a) ya observaron dicha transición al aumentar la altura de un obstáculo a saltar y observando la relación de fases entre las diferentes partes del tren inferior en el despegue y en la caída, por lo que es muy posible que en este estudio también se produzca una transición de este tipo que no se puede observar si se analiza una variable que describe el comportamiento global del cuerpo como es la aplicación de la fuerza. Probablemente el organismo se autoorganiza de forma que, a pesar de que se modifique la relación entre sus diferentes partes, el resultado de una variable que recoja la globalidad del cuerpo es mucho más estable y el parámetro de control debe modificarse en mayor medida para observar una transición de dicha variable. Un análisis cinemático de la tarea propuesta podría indicarnos si esto es así, especialmente si evaluáramos series temporales continuas.

Lo que sí que se observó en nuestro estudio, a pesar de no haberse cuantificado debido a que pretendíamos aislar esta variable, fue que los sujetos pretendían modificar su posición de partida para saltar a la plataforma a partir de una determinada distancia. Los investigadores debíamos advertir a los sujetos de este cambio y modificar su posición de nuevo para que en todos los intentos partieran de la misma posición, pero este hecho podía ser objeto de estudio del fenómeno de las transiciones. Liu y Burton (1999) ya analizaron este fenómeno aumentando la distancia de lanzamiento de un tiro a canasta, observando que a partir de una determinada distancia se modificaba la posición de los sujetos para lanzar.

En los saltos con profundidad o drop jumps (estudio B) se observó un fenómeno parecido. Los valores obtenidos por el análisis de Fourier en el primer tercio de las series temporales mostraron claramente una relación positiva entre la amplitud de las frecuencias observadas y la altura desde la que se saltaba. Esta relación se dio en los tres componentes de la fuerza, pero fue especialmente alta y significativa en el eje anteroposterior. La aparición de la relación significativa en el eje vertical que no se dio en el estudio A pudo ser debida a que, en este caso, la variedad de la tarea se centró precisamente en este eje, al aplicar una mayor fuerza vertical al aumentar la altura de caída. En cambio, cuando se analizaron el resto de las series temporales, volvimos a tener resultados muy distintos, mostrando incluso relaciones inversamente proporcionales.

Al observar las series temporales de los sujetos, vemos también que en este caso el aumento de los valores de Fourier obtenidos pudo ser debido al aumento de la amplitud de las fluctuaciones y, en el caso de la fuerza mediolateral, también al aumento del número de fluctuaciones. En la fuerza vertical ya se ha observado en otros estudios que el aumento de la altura de caída de un salto provoca un primer pico de fuerza más elevado (Stergiou et al., 2001b).

El posicionamiento del sujeto en una situación cada vez más crítica provocó un aumento de las fluctuaciones, pero probablemente para observar un

aumento claro en el número de fluctuaciones en la primera fase del tiempo de contacto se debería incrementar todavía más la altura de la caída. Todos los sujetos fueron capaces de caer sin dificultad desde la máxima altura (105 cm) y saltar posteriormente, de lo que se deduce que podían haber caído desde una altura superior. Evidentemente, no podíamos proponer un test de ese tipo a sujetos no entrenados específicamente para ello poniendo en peligro su integridad física, pero probablemente se observaría un aumento crítico de las fluctuaciones en la zona de transición y un cambio de patrón posteriormente.

Los resultados del estudio C refuerzan los obtenidos en el primero, ya que se observaron tendencias muy similares. La amplitud total de las frecuencias que aparecieron en las series temporales de la aplicación de la fuerza aumentó a medida que aumentaba la distancia desde la que los sujetos saltaban o la altura desde la que los sujetos caían.

La medida de las frecuencias y fluctuaciones que aparecen en las series temporales de la aplicación de la fuerza podría ser un parámetro para evaluar la eficacia de un entrenamiento, pero sobretodo pone de manifiesto la autoorganización dinámica y no lineal de los organismos al saltar. Este fenómeno seguramente se puede observar en otro tipo de acciones motrices y a otros niveles de estudio, tal y como se ha mostrado en la parte teórica de la tesis, y reclama la modificación de ciertos métodos de entrenamiento o de actividad física que no respetan la naturaleza compleja, dinámica y no lineal de los organismos. Estas modificaciones ya se han comentado en la parte teórica de la tesis.

Para cuantificar las fluctuaciones también se podrían haber utilizado otros métodos de análisis que quizá hubieran podido complementar los resultados obtenidos. La transformación de Fourier es un análisis lineal que nos ha permitido observar el aumento de la amplitud de las frecuencias con la distancia o con la altura de la caída previa al salto, pero un análisis no lineal podría habernos dado más información sobre los cambios entre las

diferentes condiciones de salto, tal y como se ha observado en estudios sobre registros electromiográficos (Webber et al., 1995).

Así, podemos concluir con este estudio que el incremento en la dificultad de la tarea disminuyendo la distancia a la zona de transición entre dos atractores produce un aumento de la amplitud de las frecuencias y de las fluctuaciones que aparecen en las series temporales de la fuerza. Esto nos sugiere que el organismo se organiza como un sistema dinámico cuando se dispone a saltar y que sería posible ver un cambio abrupto de patrón de la acción motriz, es decir, una transición entre dos atractores, si sometiéramos a los sujetos a una situación más extrema. En el otro grupo de acciones motrices utilizadas en el estudio 1, las flexiones de tres apoyos, ya hemos observado en otro estudio que en la zona de transición entre dos atractores, el punto de fallo muscular, se producen fluctuaciones críticas de mayor frecuencia que las observados antes de que se diera dicho fallo (Balagué y Torrents, 2003; Zakythinaki et al., 2002).

La medida de las frecuencias que aparecen en las series temporales de la aplicación de la fuerza y por tanto de su variabilidad parece presentarse como una nueva variable de estudio para analizar la ejecución de los saltos y que nos puede dar mucha información sobre el estado del sujeto, sobre la dificultad de la tarea, o sobre el estrés que supone la aplicación de cada carga al organismo. La susceptibilidad de mejora con el entrenamiento de esta variable y la forma en la que se traduce esta mejora debería de ser investigada en un futuro. En tareas cíclicas ya se ha demostrado como las fluctuaciones en el movimiento disminuyen con el aprendizaje y se considera una variable que mide la estabilidad de éste (Schmidt et al., 1992). Por lo tanto, las fluctuaciones y en consecuencia la variabilidad de la serie temporal puede darnos información sobre el sujeto, y no debe considerarse como ruido que deba ser eliminado (Hamill et al., 1999).

IV- CONCLUSIONES

1- Conclusiones de la parte teórica

De la parte teórica de esta tesis, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los conceptos que surgen de la teoría de los sistemas dinámicos pueden aplicarse al organismo humano en movimiento, y nos ayudan a comprender cómo se produce la coordinación de este movimiento y la coordinación con otras personas
- Las herramientas de análisis que surgen de la teoría de los sistemas dinámicos pueden utilizarse para estudiar el movimiento humano, la evolución de los parámetros fisiológicos o el proceso del entrenamiento deportivo.
- El ser humano es un sistema dinámico complejo que se autoorganiza para moverse. Al estudiar la coordinación de diferentes movimientos se observan propiedades de la dinámica de todo sistema dinámico complejo: el sistema posee estados que le atraen y se producen transiciones de uno a otro en función de la actuación de un parámetro de control específico. En las transiciones se produce una pérdida de estabilidad y aparecen fluctuaciones críticas.
- El aprendizaje motor y los procesos de adaptación estarán condicionados por la presencia de dichos estados atractores y por la necesaria desestabilización de éstos para poder aprender y crear nuevos atractores
- En el entrenamiento deportivo se deben aprender a ejecutar acciones motrices que también deberían mostrar propiedades de la dinámica de todo sistema dinámico complejo. Esto se ha demostrado en

algunas de estas acciones motrices, por lo que su práctica estará condicionada a los mismos principios que los observados en los estudios sobre aprendizaje motor.

- La distribución de los atractores de un organismo será exclusiva de éste y del momento en el que se encuentre, por lo que la individualización del entrenamiento será imprescindible, y la reproducción de modelos universales no podrá ser efectiva para todos los sujetos.
- Para aprender o mejorar la ejecución de una acción motriz deportiva, se deberá crear un nuevo estado que atraiga al sistema. Esto se producirá de forma global, por lo que se recomienda tener siempre en cuenta la globalidad del atleta y de sus respuestas, desestabilizar al sistema mediante la variación de estímulos y poner los condicionantes necesarios en el entorno del atleta o en la tarea en sí para que el aprendizaje vaya en la dirección deseada.
- Algunos métodos de trabajo corporal relacionados con la terapia o con la expresión corporal que han surgido de forma empírica (por ejemplo el método Feldenkrais® o la danza Contact-improvisation) proponen metodologías de aprendizaje que respetan todos los principios de la TSD. La teoría del entrenamiento y su aplicación podrían beneficiarse de la observación de dichos métodos.

2- Conclusiones de la parte empírica

De la parte empírica de esta tesis, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

2.1- Conclusiones del estudio 1: El entrenamiento diferencial en la gimnasia aeróbica

- El entrenamiento diferencial parece ser más eficaz para mejorar la ejecución de elementos de dificultad de la gimnasia aeróbica que el entrenamiento tradicional basado en repeticiones.
- El número de variaciones propuesto en el periodo de entrenamiento diferencial es probablemente excesivo, y se podrían haber obtenido resultados similares combinando los dos métodos de entrenamiento.
- La cuantificación de la carga teniendo en cuenta el número de variaciones o diferencias que se proponen se presenta como una variable que afecta al rendimiento.
- Los resultados son muy variables a lo largo de todo el estudio, lo que reafirma la utilidad del análisis mediante series temporales en lugar de utilizar parámetros discretos.
- Los resultados también difieren en función de la herramienta de análisis utilizada. El PerPot metamodel proporciona información valiosa, pero se debería revisar su aplicabilidad cuando se utiliza la cuantificación cualitativa de la carga.

- Se requiere una variable que tenga en cuenta la dinámica global y no lineal del comportamiento del sistema y que sea capaz de valorar el estado de aprendizaje y de estabilidad de la tarea propuesta.

2.2- Conclusiones del estudio 2: Fluctuaciones y estabilidad en la ejecución del salto vertical

- El incremento de la dificultad de un salto provoca un aumento en el número y/o amplitud de las fluctuaciones que se producen especialmente en el primer tercio de las series temporales de los tres componentes de la fuerza (F_x , F_y y F_z).
- Este incremento de las fluctuaciones es una señal de la no-linealidad del comportamiento del sistema y muestra que el organismo se autoorganiza como cualquier sistema dinámico mientras ejecuta acciones motrices deportivas.
- La medida y cuantificación de las fluctuaciones se presenta como una nueva variable de estudio que nos puede dar información cualitativa sobre el estado del sujeto, la dificultad de la tarea o el estrés sufrido por el organismo.

V- PERSPECTIVAS DE FUTURO

Además de los objetivos descritos, esta tesis también pretende ayudar a difundir los conocimientos surgidos desde la aparición de la TSD en la investigación sobre el comportamiento motor y animar a otros investigadores relacionados con el ámbito deportivo a que se interesen por esta perspectiva. La relativa novedad de este campo provoca que cada estudio que se lleva a cabo plantee infinidad de nuevas preguntas y cuestiones aún sin resolver. Este hecho, lejos de resultar una dificultad para la expansión de los conocimientos surgidos, ayuda a que muchos otros investigadores sigan explorando en la misma línea o que a partir de las conclusiones de un estudio se lleven a cabo muchos otros. Aún hoy en día, 25 años después de que Scott Kelso ideara la tarea de la cual posteriormente se haría el modelo HKB, se sigue investigando sobre las causas de ese fenómeno concreto coordinativo (Peper et al., 2004), probablemente por las enormes posibilidades de aplicación a cualquier otra tarea motriz.

En nuestro caso, las conclusiones del primer estudio nos sugirieron nuevas líneas de investigación y el diseño del segundo estudio. Las conclusiones de éste último nos provocaron un proceso similar. Observamos señales de no-linealidad como el aumento de fluctuaciones al acercarnos a una zona de transición, pero no pudimos observar lo que sucedía si se producía un cambio de atractor o bifurcación. Por este motivo nos planeamos escoger el otro grupo de acciones motrices utilizadas en el primer estudio, las flexiones de tres apoyos, para mostrar como también se dan señales de no-linealidad y para observar qué sucede cuando ocurre una transición. Los primeros resultados ya se han explicado en la parte teórica de esta tesis (véase apartado 6.1). No obstante, las otras conclusiones que hemos obtenido, tanto de la parte empírica como de la parte teórica, nos sugieren muchas otras líneas de investigación relacionadas con el ámbito deportivo. A continuación se muestran algunos ejemplos:

- Buscar nuevas formas de facilitar el aprendizaje o entrenamiento de tareas deportivas mediante condicionantes del entorno. A pesar de que ya hay algunos estudios en esta dirección, consideramos que se podría aplicar a cualquier deporte y se podrían sugerir infinidad de nuevos métodos de entrenamiento.
- Observar métodos de trabajo corporal que han surgido de forma empírica, como el método Feldenkrais®, el Contact-improvisation u otros que no hemos citado en la tesis como la técnica Alexander, la danza creativa, el Body-Mind Centering®... y establecer su relación con la TSD. Investigar qué propuestas de esos métodos pueden ser aplicadas para mejorar el entrenamiento deportivo.
- Demostrar la autoorganización entre personas en actividades físicas o deportivas de cooperación-oposición y utilizar este principio para facilitar el aprendizaje o el entrenamiento.
- Analizar las posibilidades de combinar el entrenamiento tradicional y el diferencial para el aumento del rendimiento deportivo en función del estado del sujeto.
- Ampliar las posibilidades de utilización del PerPot en la investigación deportiva y estudiar si es una herramienta suficientemente sensible al sobreentrenamiento por causas coordinativas.
- Analizar la importancia de la carga cualitativa para la planificación deportiva
- Estudiar las posibilidades que ofrece el análisis de las fluctuaciones en la ejecución de tareas deportivas. Valorar cómo varía la aparición de estas fluctuaciones en función del estado de aprendizaje de la tarea o acción de estudio, en función de la fatiga o estrés del sujeto o en función de la dificultad de la tarea.

- Buscar nuevos métodos de valoración que respeten la globalidad y no-linealidad del organismo humano y que puedan servir para evaluar el aprendizaje de nuevas tareas y su estabilidad.

En resumen, la reciente inmersión de la TSD en las ciencias de la actividad física y el deporte se presenta como una invitación al cambio, al progreso. Todas las conclusiones que se han obtenido nos sugieren propuestas prácticas ecológicas y holísticas, que respetan al individuo y a su entorno, plenamente acordes con las tendencias hacia las que tiende la investigación actual relacionada con el ser humano.

VI- BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, R. H., & Shaw, C. S. (1992). *Dynamics- The geometry of behavior* .
Adison-wesley publishing company.
- Adams J.A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, (3), 111-150.
- Aguado, X. (1993). *Eficacia y técnica deportiva. Análisis del movimiento humano*. Barcelona: Inde.
- Allum, J. H. J., Dietz, V., & Freund, H. J. (1978). Neuronal mechanisms underlying physiological tremor. *Journal of Neurophysiology*, 41, 557-571.
- Amazeen, P. G., Amazeen, E. L., & Beek, P. J. (2001). Coupling of breathing and movement during manual wheelchair propulsion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(5), 1243-1259.
- Amazeen, P. G., Amazeen, E. L., & Turvey, M. T. (2004). Symmetry and the devil. *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 371-372.
- Amjad, A. M., Conway, B. A., Farmer, S. F., O'Leary C.O., Halliday, D. M., & Rosenberg, J. R. (1994). A load-independent 30-40 Hz component of physiological tremor in man. *Journal of Phisiology*. Vol. 476P, 21P.
- Andronov, A. A., & Chaikin, C. E. (1937). *Theory of oscillations*. Princeton University Press.

- Angulo-Kinzler, R. M. (2001). Exploration and selection of intralimb coordination patterns in 3-months-old infants. *Journal of Motor Behavior*, 33(4), 363-376.
- Aracil, J. (1986). *Máquinas, sistemas y modelos. Un ensayo sobre sistemática*. Madrid: Tecnos.
- Asmussen, E., & Bonde-Petersen, F. (1974). Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiological Scandinavica*, 91, 385-392.
- Athènes, S., Sallagoïty, I., Zanone, P., & Albaret, J. (2004). Evaluating the coordination dynamics of handwriting. *Human Movement Science*, 23, 621-641.
- Balagué, N. (2004). Hacia una comprensión compleja del rendimiento deportivo. *III Congreso Vasco del Deporte*, Vitoria.
- Balagué, N., & Torrents, C. (2003). Variability and fluctuations: errors or key factors for performance. *8th Annual Congress of the European College of Sport Sciences Salzburg*.
- Balasubramaniam, R., Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2000). Specificity of postural sway to the demands of a precision task. *Gait and Posture*, 11, 12-24.

- Baldissera, F., Cavallari, P., & Civashi, P. (1982). Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neuroscience Letters*, 34, 95-100.
- Baldissera, F., Cavallari, P., Maarini, G., & Tassone, G. (1991). Differential control of in-phase and anti-phase coupling of rhythmic movements of ipsilateral hand and foot. *Experimental Brain Research*, 83, 375-380.
- Bardy, B. G., Marin, L., Stoffregen, T. A., & Bootsma, R. J. (1999). Postural coordination modes considered as emergent phenomena. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1284-1301.
- Bardy, B. G., Oullier, R. O., Bootsma, J., & Stoffregen, T. A. (2002). Dynamics of human postural transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(3), 499-514.
- Barlow, D. H., & Hersen, M. (1984). *Diseños de caso único*. Barcelona: Martínez Roca.
- Beckman, H., Schöllhorn, W. (2003) Differential learning in shot put. Schöllhorn, W. I., Bohn, C., Jäger, J. M., Schaper, H., & Alichmann, M. *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology*. Köln: Sport Buch Strauss.

- Beek, P. J. (2000). Toward a theory of implicit learning in the perceptual-motor domain. *Journal of Sport Psychology*, (31), 547-554.
- Beek, P. J., & Peper, C. E. (2004). Perceptible goals matter, but let's not overdo it! *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 373-375.
- Beek, P. J., Peper, C. E., & Stegeman, D. F. (1995). Dynamical models of movement coordination. *Human Movement Science*, 14, 573-608.
- Beek, P. J., & van Stanvoord, A. A. M. (1992). Learning the cascade juggle: a dynamical analysis. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 85-94.
- Bernaola-Galván, P. (2002). Segmentación de senales cardíacas. *Actas del Congreso No lineal, dinámica no lineal en la naturaleza y en la técnica*. Cuenca: Universidad de Catilla-La Mancha.
- Bernaola-Galván, P., Ivanov, P. Ch., Nunes, L. A., & Eugene, H. (2001). Scale invariance in the nonstationary of human Heart rate. *Physical Review Letters*, 87(16), 168105.
- Bernasconi, P., & Kohl, J. (1993). Análisis of co-ordination between breathing and exercise rhythms in man. *Journal of Physiology*, 417, 693-706.
- Bernstein, N. A. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Nueva York: Pergamon Press.
- Bernstein, N. A. (1989). *Fisiología del movimiento*. Roma: Societa Stampa Sportiva.

-
- Bertalanffy, L. V. (1976). *Teoría general de sistemas*. Méjico: Fondo de cultura económica.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., & Jan van Ingen Schenau, G. (1987). Drop Jumping I. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. *Medicine & Science in Sports and Exercise*, 19(4), 332-338.
- Bobbert, M. F., & Jan van Ingen Schenau, G. (1988). Coordination in vertical jumping. *Journal of Biomechanics*, 21(3), 249-262.
- Boker, S. M., Schreiber, T., Pompe, B., & Bertenthal, B. I. (1998). Nonlinear analysis of perceptual-motor coupling in the development of postural control. G. Meyer-Kress, H. Kantz, & J. Kurths *Nonlinear analysis of physiological data* . Berlin: Springer-Verlag.
- Bongaardt, R., & Meijer, O. G. (2000). Bernstein's theory of movement behavior: historical development and contemporary relevance. *Journal of Motor Behavior* , 32(1), 57-71.
- Bosco, C. (1994). *La valoración de la fuerza con el test de Bosco*. Barcelona: Paidotribo.
- Bouffard, M. (1993). The perils of averaging data in adapted physical activity research. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 10, 371-391.

-
- Bouisset, S., & Le Bozec, S. (1998). Posturo-kinetic capacity and postural function in voluntary movements. M. L. Latash *Progress in Motor Control. Volume two:structure-function relations in voluntary movements* . USA: Human Kinetics.
- Bramble, D. M., & Carrier, D. R. (1983). Running and breathing in mammals. *Science, 219*, 251-256.
- Brisswalter, J., & Mottet, D. (1996). Energy cost and stride duration variability at preferred gait speed between walking and running. *Canadian Journal of Applied Physiology, 21*, 471-480.
- Broderick, M. P., & Newell, K. M. (1999). Coordination patterns in ball bouncing as a function of skill. *Journal of Motor Behavior, 31*(2), 165-188.
- Bruhn, S., Kullmann, N., & Gollhofer, A. (2004). The effects of a sensorimotor training and strength training on postural stabilisation, maximum isometric contraction and jump performance. *International Journal of Sports Medicine, 25*, 56-60.
- Buchanan, J. J., & Kelso, J. A. S. (1999). To switch or not to switch: Recruitment of degrees of freedom stabilizes biological coordination. *Journal of Motor Behavior, 31*(2), 126-144.

- Buchanan, P. A., & Ulrich, B. D. (2001). The Feldenkrais method: A dynamic approach to changing motor behavior. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 72(4), 315-323.
- Buekers, M. J. (2000). Can we be so specific to claim that specificity is the solution for learning sport skills? *International Journal of Sport Psychology*, 31, 485-489.
- Buekers, M. J., Montagne, G., & Laurent, M. (1999). Is the player in control, or is the control somewhere out of the player? *International Journal of Sport Psychology*, 30, 490-506.
- Burgess-Limerick, R., Shemmell, J., Barry, B. K., Carson, R. G., & Abernethy, B. (2001). Spontaneous transitions in the coordination of a whole body task. *Human Movement Science*, 20, 549-562.
- Button, C., Bennett, S., & Davids, K. (2001). Grasping a better understanding of the intrinsic dynamics of rhythmical and discrete prehension. *Journal of Motor Behavior*, 33(1), 27-36.
- Byblow, W. D., Carson, R. G., & Goodman, D. (1994). Expressions of asymmetries and anchoring in bimanual coordination. *Human Movement Science*, 13, 3-28.

-
- Byblow, W. D., Chua, R., Bysouth-Young, D. F., & Summers, J. J. (1999). Stabilisation of bimanual coordination through visual coupling. *Human Movement Science* , 18, 281-305.
- Byblow, W. D., Chua, R., & Goodman, G. (1995). Asymmetries in coupling dynamics of perception and action. *Journal of Motor Behavior* , 27, 123-137.
- Calvin, S. Temprado, J.J. (2003)Coalition of informational and neuromuscular constraints in a synchronization task. Schöllhorn, W. I., Bohn, C., Jäger, J. M., Schaper, H., & Alichmann, M.. *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology*. Köln: Sport Buch Strauss.
- Capra, F. (1985). *El punto crucial*. Barcelona: Integral.
- Capra, F. (1996). *La trama de la vida*. Barcelona: Anagrama.
- Carnahan, H., & Lee. T. D. (1989). Training for transfer of a movement timing skill. *Journal of Motor Behavior* , 21, 48-59.
- Carson, R. G. (1995). The dynamics of isometric bimanual coordination. *Experimental Brain Research* , 105, 465-476.
- Carson, R. G., Byblow, W. D., Abernethy, B., & Summers, J. J. (1996). The contribution of inherent and incidental constraints to intentional switching between patterns of bimanual coordination. *Human Movement Science*, 15 , 565-589.

-
- Carson, R. G., Goodman, D., Kelso, J. A. S., & Elliot, D. (1995). Phase transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. *Journal of Motor Behavior*, 27, 211-224.
- Carson, R. G., & Riek, S. (2000). Musculo-skeletal constraints on corticospinal input to upper limb motoneurons during coordinated movements. *Human Movement Science*, 19, 451-474.
- Carson, R. G., Riek, S., Byblow, W. D., Abernethy, B., & Summers, J. J. (1999). The timing of intralimb coordination. *Journal of Motor Behavior*, 31(2), 113-118.
- Carson, R. G., Riek, S., Smethurst, C. J., Lison, J. F., & Byblow, W. D. (2000). Neuromuscular-skeletal constraints upon the dynamics of unimanual and bimanual coordination. *Experimental Brain Research*, 131, 196-214.
- Cavagna, G. A., Dusman, B., & Margaria, R. (1968). Positive work done by previously stretched muscle. *Journal of Applied Physiology*, 24(1), 21-32.
- Corbetta, D., & Bojczyk, K. E. (2002). Infants return to two-handed reaching when they are learning to walk. *Journal of Motor Behavior*, 34(1), 83-95.
- Corbetta, D., & Verijken, B. (1999). Understanding development and learning of motor coordination in sport: the contribution of dynamic systems theory. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 507-530.

- Corna, S., Tarantola, J., Nardone, A., Giordano, A., & Schieppati, M. (1999). Standing of a continuously moving platform: Is body inertia counteracted or exploited? *Experimental Brain Research*, 124, 331-341.
- Court, M. L. J., Bennett, S. J., Williams, A. M., & Davids, K. (2002). Local stability in coordinated rhythmic movements: fluctuations and relaxation times. *Human Movement Science*, 21, 39-60.
- Cruz, J., & Riera, J. (1991). Psicología del deporte: Valoración de las primeras definiciones y del replanteamiento de la década de los ochenta. J. Riera, & J. Cruz *Psicología del deporte. Aplicaciones y perspectivas*. Barcelona: Editorial Martínez Roca.
- Davids, K., Bennett, S., Handford, C., & Jones, B. (1999). Acquiring coordination in self-paced, extrinsic timing tasks: a constraints-led perspective. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 437-461.
- Davids, K., & Button, C. (2000). The cognition-dynamics interface and performance in sport. *International Journal of Sport Psychology*, 31, 515-521.
- Davids, K., Handford, C., Bennett, S., & Kingsbury, D. (2000). Perception-action coupling: implications for practice organisation during acquisition of self-paced extrinsic timing tasks. *Congres International de la SFPS-Symposia* París: INSEP.

- Davids, K., Handford, C., & Williams, M. (1994). The natural physical alternative to cognitive theories of motor behaviour. An invitation for interdisciplinary research in sport science? *Journal of Sport Sciences*, 12, 495-528.
- Delignieres, D., Nourrit, D., Sioud, R., Leroyer, P., Zattara, M. & Micallef, J.P. (1998) Preferred coordination modes in the first steps of the learning of a complex gymnastics skill. *Human movement Science*, 17, 221-241
- Diedrich, F. J., & Warren, W. H. (1995). Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 183-202.
- Diedrich, F. J., & Warren, W. H. (1998). The dynamics of gait transitions. Effects of grade & load. *Journal of Motor Behavior*, 30(1), 60-78
- Dijkstra, T. M. H., Schöner, G., Giese, M. A., & Gielen, C. C. A. M. (1994). Frequency dependence of the action-perception cycle for postural control in a moving visual environment: relative phase dynamics. *Biological Cybernetics*, 71, 489-501.
- Dixon, E. M., Kamath, M. V., McCartney, N., & Fallen, E. L. (1992). Neural regulation of heart rate variability in endurance athletes and sedentary controls. *Cardiovascular Research*, 26, 713-719.

- Donker, S. F., Beek, P. J., Wagenaar, R. C., & Mulder, T. (2001). Coordination between arm and leg movements during locomotion. *Journal of Motor Behavior*, 33(1), 86-102.
- Dowling, J., & Vamos, L. (1993). Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9, 95-110.
- Ebenbichler, G. R., Kollmitzer, J., Erim, Z., Löscher, W. N., Kersch, K., Posch, M., Nowotny, T., Kranzl, A., Wöber, C., & Bochsansky, T. (2000). Load dependence of fatigue related changes in tremor around 10 Hz. *Clinical Neurophysiology*, 111, 106-111.
- Eidson, T. A., & Stadulis, R. E. (1991). Effects of variability of practice on the transfer and performance of open and closed motor skills. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 8, 342-356.
- Elble, R. J., & Randall, J. E. (1976). Motor unit activity responsible for 8-12 Hz component of physiological finger tremor. *Journal of Neurophysiology*, 39, 370-383.
- Enoka, K. M., & Stuart, D. G. (1992). Neurobiology of muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 72, 1631-1648.
- Espar, X. (2002). Relaciones preferenciales en el entrenamiento integrado en balonmano. *Rendimiento Deportivo.Com*, (3).

-
- Ewing, J. L., Wolfe, D. R., Rogers, M. A., Amundson, M. L., & Stull, G. A. (1990). Effects of velocity of isokinetic training on strength, power and quadriceps muscle fibers characteristics. *European Journal of Applied Physiology*, 61, 159-162.
- Farley, C. T., & Taylor, C. R. (1991). A mechanical trigger for the trot-gallop transition in horses. *Science*, 253, 306-308.
- Feigenbaum, M.J. (1980) The metric universal property of period doubling bifurcation and the spectrum for a route of turbulence. *Annals of the New York Academy of Sciences* 357, 330-336
- Feldenkrais, M. (1985). *Autoconciencia por el movimiento*. Barcelona: Paidós.
- Feyerabend, P. (1975). *Against method*. Humanities Press.
- FIG (Fédération internationale de gymnastique). (2004). *Aerobic gymnastics. Code of points 2005-2008*. FIG.
- FISAF (Federation of International Sports Aerobics and Fitness) . (1999). *Código internacional de aeróbic deportivo*.
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *El rendimiento humano*. Alcoy: Marfil.
- Fitzpatrick, P., Schmidt, R. C., & Carello C. (1996). Dynamical patterns in clapping behavior. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(3), 707-724.

-
- Fitzpatrick, P., Schmidt, R. C., & Lockman, J. J. (1996). Dynamical patterns in the development of clapping. *Child Development, 67*(6), 2691-2708.
- Fowler, N. E., & Less, A. (1998). A comparison of the kinetic and kinematic characteristics of plyometric drop jump and pendulum exercises. *Journal of Applied Biomechanics, 14*, 260-275.
- Franz, E. A. (2004). On the perceptual control of bimanual performance. *Journal of Motor Behavior, 36*(4), 380-381.
- Franz, E. A., Zelaznik, H. N., & McCabe, G. (1991). Spatial topological constraints in a bimanual task. *Acta Psychologica, 77*(2), 137-151.
- Friedrich, R., Jirsa, V. K., Haken, H., & Uhl, C. (1998). Analyzing spatio-temporal patterns of complex systems. G. Meyer-Kress, H. Kantz, & J. Kurths *Nonlinear analysis of physiological data*. Berlin: Springer-Verlag.
- Fuchs, A., & Jirsa, V. K. (2000). The HKB model revisited: How varying the degree of symmetry controls dynamics. *Human Movement Science, 19*, 425-449.
- Fuchs, A., & Kelso, J. A. S. (1994). A theoretical note on models of interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20*(5), 1088-1097.

- Furness, P., Jessop, J., & Lippold, O. C. J. (1977). Long-lasting increases in the tremor of human hand muscles following brief, strong effort. *Journal of Physiology*, 265, 821-831.
- Gajewski, J., & Viitasalo, J. T. (1994). Does the level of adaptation to a heavy physical effort influence fatigue-induced changes in tremor amplitude? *Human Movement Science*, 13, 211-220.
- Gambetta, V. (1989). New trends in training theory. *New Studies in Athletics*, 3, 7-10.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Review*, 81, 1725-1789.
- García, M. (2002). Autoorganització fluidodinàmica: una aproximació quasi exclusivament estètica. *Metode*, (35), 51.
- García Manso, J. M. (1997). Hacia un nuevo enfoque teórico del entrenamiento deportivo. *INFOCOES*, 2, 3-14.
- García Manso, J. M. (1999). *Alto rendimiento, la adaptación y la excelencia deportiva*. Madrid: Gymnos Colección Entrenamiento Deportivo.
- Garland, S. J., Enoka, R. M., Serrano, L. P., & Robinson, G. A. (1994). Behavior of motor units in human biceps brachii during a submaximal fatiguing contraction. *Journal of Applied Physiology*, 76(6), 2411-2419.

- Garlando, F., Kohl, J., Koller, E. A., & Pietsch, P. (1985). Effect of coupling the breathing and cycling rhythms on oxygen uptake during bicycle ergometry. *European Journal of Applied Phsisiology*, *54*, 497-501.
- Georgopoulos, A. P. (1998). Behavioral and neural aspects of motor topology. M. L. Latash *Progress in motor control. Structure-function relations in voluntary movements* . USA: Human Kinetics.
- Gibson, J. J. (1975). Events are perceivable but time is not. J. T. Fraser, & N. Lawrence *The Study of Time*, 2 . Berlin: Springer Verlag.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception* . USA: Houghton Mifflin Com pany.
- Gleick, J. (1987). *Caos, la creación de una ciencia*. Barcelona: Seix Barral.
- Goldberger A.L., Rigney, D. R., & West, B. J. (1990). *Chaos and fractals in human physiology*. Scientific American .
- Goldfield, E. C., Kay, B. A., & Warren, W. H. (1993). Infant bouncing: The assembly and tuning of action systems. *Child Development*, *64*(4), 1128-1142.
- Gonzáliz Badillo, J. J., & Gorostiagoa, E. (1997). *Fundamentos del entrenamiento de la fuerza*. Barcelona: Inde.

- Goodman, L., Riley, M. A., Mitra, S., & Turvey, M. T. (2000). Advantages of rhythmic movements at resonance: minimal active degrees of freedom, minimal noise, and maximal predictability. *Journal of Motor Behavior*, 32(1), 3-8.
- Gregson, R. A. M. (1988). *Nonlinear psychophysical dynamics*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, publishers.
- Guarrera- Bowlby, P. L., & Gentile, A. M. (2004). Form and variability during sit-to-stand transitions: children versus adults. *Journal of Motor Behavior*, 36(1), 104-114.
- Gutiérrez, A. (2002). *El conocimiento previo de los errores en el aprendizaje de las habilidades gimnásticas del aeróbic deportivo*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, Granada.
- Hagbarth K.E., Jessop, J., Eklund, G., & Wallin, E. U. (1983). The Piper rhythm-a phenomenon related to muscle resonance characteristics? *Acta Physiologica Scandinavian*, 117, 263-271.
- Hagbarth, K. E., & Young, R. R. (1979). Participation of the stretch reflex in human physiological tremor. *Brain*, 102, 509-526.
- Haken, H. (1975). Cooperative phenomena in systems far from thermal equilibrium and in nonphysical systems. *Reviews of Modern Physics*, 47, 67.

- Haken, H. (1994). *Fórmulas de éxito en la naturaleza sinérgica: la doctrina de la acción de conjunto*. Barcelona: Biblioteca científica Salvat.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.
- Hall, K., & Magill, R. A. (1995). Variability of practice and contextual interference in motor skill learning. *Journal of Motor Behavior*, 27, 299-309.
- Hamill, J., Van Emmerik, R. E. A., Heiderscheit, B. C., & Li, L. (1999). A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clinical Biomechanics*, 14, 297-308.
- Hausdorff, J. M., Zeman, L., Peng, C. K., & Goldberger, A. L. (1999). Maturation of gait dynamics: stride-to stride variability and its temporal organization in children. *Journal of Applied Physiology*, 86(3), 1040-1047.
- Hayles, N. K. (1998). *La evolución del caos*. Barcelona: Gedisa.
- Heiderscheit, B. C., Hamill, J., & Van Emmerik, R. E. A. (1999). Q-angle influences on the variability of lower extremity coordination during running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(9), 1313-1319.
- Heitkamp, H. C., Horstmann, T., Mayer, J., & Dickhuth, H. H. (2001). Gain in strength and muscular balance after balance training. *International Journal of Sports Medicine*, 22, 285-290.

- Hergenhahn, B. R. (2001). *Introducción a la historia de la psicología*. Madrid: Paraninfo.
- Hodges, N. J., & Franks, I. M. (2002). Learning as a function of coordination bias: building upon pre-practice behaviours. *Human Movement Science*, 21, 231-258.
- Holt, K. G., Jent, S. F., Ratcliffe, R., & Hamill, J. (1995). Energetic cost and stability during human walking at the preferred stride frequency. *Journal of Motor Behavior*, 27(2), 164-173.
- Horak, F. B., Nashner, L. M., & Diener, H. C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 82, 167-177.
- Hoyer, D., Bauer, R., Pompe, B., Palus, M., Zebrowski, J. J., Rosenblum, M., & Zwiener, U. (1998). Nonlinear análisis of the cardiorespiratory coordination in a newborn piglet. G. Meyer-Kress, H. Kantz, & J. Kurths *Nonlinear analysis of physiological data*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hreljac, A. (1993). Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(10), 1158-1162.
- Hreljac, A. (1995). Determinants of the gait transition speed during human locomotion: kinematic factors. *Journal of Biomechanics*, 28(6), 669-677.

-
- Hughes, M., Dawkins, N., David, R., & Mills, J. (1998). The perturbation effect and goal opportunities in soccer. *Journal of Sport Sciences*, 16, 20.
- Hull, C. L. (1943). *Principles of behavior*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Ingvaldsen, R. P., & Whiting, H. T. A. (1997). Modern views on motor skill learning are not representative. *Human Movement Science*, 16, 705-732.
- Iqbal, K., & Pai, Y.-C. (2000). Predicted region of stability for balance recovery: motion at the knee joint can improve termination of forward movement. *Journal of Biomechanics*, 33, 1619-1627.
- Jaitner, T., Kretzschmar, D., & Hellstern, W. (2003). Changes of movement patterns and hurdle performance following traditional and differential hurdle training. *8th annual congress of the ECSS Salzburg*: Institute of Sport Science.
- Jaitner, T., Mendoza, L., & Schöllhorn, W. (1998). Possibilities of implicit motor learning in long jump performance investigated biomechanically. *Proceedings II: ISBS'98*.
- Jaitner, T., Mendoza, L., & Schöllhorn, W. (2001). Analysis of the long jump technique in the transition from approach to take-off based on time-continuous kinematic data. *6th annual Congress of the European College of Sport Science Colonia*: Sport und Buch Strauss GmbH.

-
- Jaitner, T., & Pfeiffer, M. (2003). Developing jumping strength based on system dynamics principles. W. I. Schöllhorn, C. Bohn, J. M. Jäger, H. Schaper, & M. Alichmann *European workshop on movement science. Mechanics, Physiology, Psychology*. Köln: Sport Buch Strauss.
- Jeka, J. J., Kelso, J. A. S., & Kiemel, T. (1993). Spontaneous transitions and symmetry: Pattern dynamics in human four-limb coordination. *Human Movement Science*, 12, 627-651.
- Jirsa, V. K. (2004). Perceptual-cognitive control as a special case in equivalent multisensory-sensorimotor interactions. *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 385-386.
- Jouhet, I., Zanone, P. G., & Albaret, J. M. (2003). Attentional cost associated with learning a new bimanual coordination pattern. W. I. Schöllhorn, C. Bohn, J. M. Jäger, H. Schaper, & M. Alichmann *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology*. Colonia: Sport Buch Strauss.
- Kantz, H., & Kurths, J. (1998). *Nonlinear analysis and physiological data*. Berlin: Springer.
- Kay, B. A. (1988). The dimensionality of movement trajectories and the degrees of freedom problem: a tutorial. *Human Movement Science*, 7, 343-367.

-
- Keele, S.W. (1968) Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387-403
- Keidel, M., & Keidel, W. D. (1989). The computer vibro-myography as a biometric process studying muscle function. *Biomedical Techniche*, 34, 107-116.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination . *American Journal of Physiology: Reg. Integ. Comp.* 15, R1000-R1004.
- Kelso, J. A. S. (1997). Relative timing in brain and behavior: some observations about the generalized motor program and self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science* , 16, 453-460.
- Kelso, J. A. S. (1998). From Bernstein's physiology of activity to coordination dynamics. M. L. Latash *Progress in motor control: Bernstein's traditions in movement studies* . Champaign, IL: Human Kinetics.
- Kelso, J. A. S. (1999). *Dynamic Patterns* . USA: Massachusetts Institute of Technology .
- Kelso, J. A. S. (2000). Principles of dynamic pattern formation and change for a science of human behavior . Bergman L.R. , R. B. Cairns, L. G. Nilsson, & L. Nystedt *Developmental science and the holistic approach* . Lawrence Erlbaum associates publishers.

- Kelso, J. A. S. (2003). Understanding human motor behavior: coordination dynamics. Balagué, N. *Proceedings of the 1st Meeting of Complex Systems and Sport*. Barcelona: International Journal of Computer Science in Sport.
- Kelso, J. A. S., & Ding, M. (1993). Fluctuations, intermittency, and controllable chaos in biological coordination. K. M. Newell, & Corcos D.M. *Variability and Motor Control*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Rubin, P., & Kugler, P. N. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes: theory and data. *Journal of Motor Behavior*, 13(4), 226-261.
- Kelso, J. A. S., & Jeka, J. J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 645-668.
- Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, 7, 27-46.
- Kelso, J. A., & Tuller, B. (1994). Converging evidence in support of common dynamical principles for speech and movement coordination. *American Journal of Physiology*, 246, R928-R935

-
- Kelso, J. A. S., & Zanone, P. G. (2002). Coordination dynamics of learning and transfer across different effector systems. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(4), 776-797.
- Komi, P. V., & Bosco, C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 10(4), 261-265.
- Kostrubiec, V., & Zanone, P. G. (2002). Memory dynamics: distance between the new task and existing behavioral patterns affects learning and interference in bimanual coordination. *Neuroscience Letters*, 331, 193-197.
- Kovács, I., Tihany, J., Devita, P., Rácz, L., & Barrier, J. (1999). Foot placement modifies kinematics and kinetics during drop jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(5), 708-716.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. G. E. Stelmach, & J. Requin *Tutorials in Motor Behavior*. Amsterdam.
- Kurz, M.J., & Stergiou, N. (2004) Applied Dynamic Systems Theory for the Analysis of Movement. Stergiou, N. *Innovative analysis of human movement*. USA: Human Kinetics.

- Köhler, W. (1941). *Dynamics in psychology*. New York: Liveright.
- Köhler, W., Koffka, K., & Sander, F. (1973). *Psicología de la forma*. Buenos Aires: Paidós.
- Lai, Q., & Shea, C. H. (1998). Generalized Motor Program (GMP) learning: effects of reduced frequency of knowledge of results and practice variability. *Journal of Motor Behavior*, 30(1), 51-59.
- Lai, Q., Shea, C. H., Wulf, G., & Wright, D. (2000). Optimizing generalized motor program and parameter learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 71(1), 10-24.
- Lames, M. (2004). Analysis of performance in tennis with relative phases. *Proceedings of the 9th European College of Sport Science* Clermont-Ferrand.
- Landin, D. K., Hebert, E. P., & Fairweather, M. (1993). The effects of variable practice on the performance of a basketball skill. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 64(2), 232-237.
- Large, E. W. (2000). On synchronizing movements to music. *Human Movement Science*, 19, 527-566.
- Lee, T. D., Swinnen, S. P., & Verschueren, S. (1992). Relative phase alterations during bimanual skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 25(2), 263-274.

- Lekhel, H., Marchand, A. R., Assaiante, C., Cremieux, J., & Amblard, B. (1994). Cross-correlation analysis of the lateral hip strategy in unperturbed stance. *Neuroreport*, *10*, 1293-1296.
- Lewis, S., Nygaard, E., Sanchez, J., Egeblad, H., & Saltin, B. (1984). Static contraction of the quadriceps muscle in man: cardiovascular control and response to one-legged strength training. *Acta Physiologica Scandinavian*, *122*, 341-353.
- Li, L. (2000). Stability landscapes of walking and running near gait transition speeds. *Journal of Applied Biomechanics*, *16*, 428-436.
- Liu, S., & Burton, A. W. (1999). Changes in basketball shooting patterns as a function of distance. *Perceptual Motor Skills*, *89*(3), 31-45.
- Lorenz, E. N. (1993). *La esencia del caos: un modelo científico para la disparidad de la naturaleza*. Círculo de lectores, University of Washington Press.
- López, D., González, S. M., Aspa, J., Soler, A., & Balagué, N. (1996). Changes on specific explosive force performance depending on the temporal application of force transfer exercises. *First Annual Congress of the ECSS Niza*.

- López, D., & Moras, G. (1997). Comparison between volleyball jumping actions and jumping ability training drills. *Second Annual Congress of the European College of Sport Science in a Changing World of Sports. Proceedings*. Copenhagen.
- López, J., Vernetta, M., & de la Cruz, J. C. (2002). Características morfológicas y funcionales del aeróbic deportivo. *Apuntes de Educación Física y Deportes*, (55), 60-65.
- Löscher, W. N., Cresswell, A. G., & Thorstensson, A. (1994). Electromyographic responses of the human triceps surae an force tremor during sustained submaximal isometric plantar flexion . *Acta Physiologica Scandinavian* , 152, 73-82.
- Magill, R. A., & Green Hall, K. (1990). A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human Movement Science* , 9, 241-289.
- Marin, L., Bardy, B. G., Baumberger, B., Flückiger, M., & Stoffregen, T. A. (1999). Interaction between task demands and surface properties in the control of goal-oriented stance . *Human Movement Science* , 18, 31-47.
- McAuley, J. H., Rothwell, J. C., & Marsden, C. D. (1997). Frequency peaks of tremor, muscle vibration and electromyographic activity at 10 Hz, 20 Hz and 40 Hz during human finger muscle contraction may reflect rhythmicities if central neural firing. *Experimental Brain Research*, 114, 525-541.

-
- McBeath, M. K., Shaffer, D. M., & Kaiser, M. K. (1995). How baseball outfielders determine where to run to catch fly balls. *Science*, *268*, 569-573.
- McCollum, G., & Leen, T. K. (1989). Form and exploration of mechanical stability limits in erect stance. *Journal of Motor Behavior*, *21*(3), 225-244.
- McGarry, T., Anderson, D. I., Wallace, A., Hughes, M. D., & Franks, I. M. (2002). Sport competition as a dynamical self-organizing system. *Journal of Sports Sciences*, *20*, 771-781.
- McGarry T., & Franks, I. M. (1996). In search of invariant athletic behaviour in sport: an example from championship squash match-play. *Journal of Sports Sciences*, *14*, 445-456.
- McGarry, T., Khan, M. A., & Franks I.M. (1999). On the presence and absence of behavioural traits in sport: an example from championship squash match play. *Journal of Sport Science*, *17*, 297-311.
- McGinnis, P. M., & Newell, K. M. (1982). Topological dynamics: a framework for describing movement and its constraints. *Human Movement Science*, *1*, 289-305.
- McKenzie, D. C. (1999). Markers of excessive exercise. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *24*(1), 66-73.

- McLeod, P., & Dienes, Z. (1993). Running to catch the ball. *Nature*, 362, 23.
- Mechner, F. (2004a). A psychological approach to human voluntary movements. *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 355-370.
- Mechner, F. (2004b). Response to commentaries: Actions as perceptual-conceptual "Gestalts". *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 408-417.
- Mechner, F., Kerzel, D., Knoblich, G., & Prinz, W. (2001). Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*, 414(6859), 69-73.
- Meijer, O. G. (1998). Bernstein versus Pavlovianism. An interpretation. M. L. Latash *Progress in motor control. Structure-function relations in voluntary movements* . USA: Human Kinetics.
- Mester, J. (2000). Movement control and balance in earthbound movements. *Biomechanics and Biology of Movement* . Human Kinetics.
- Mester, J., Hartmann, U., Niessen, M., & Perl, J. (2000). Time series analyses and metamodels for analyses of physiological adaptation. *5th Annual Congress of the European College of Sport Science. Proceedings*. Jyväskylä: University of Jyväskylä.

- Milliex, L., Calvin, S., & Temprado, J. J. (2003). Recruitment of degrees of freedom in a synchronisation task: result of a coalition of constraints. W. I. Schöllhorn, C. Bohn, J. M. Jäger, H. Schaper, & M. Alichmann *European workshop on movement science. Mechanics, Physiology, Psychology* . Köln: Sport Buch Strauss.
- Minetti, A. E., Ardigo, L. P., & Saibene, F. (1994). The transition between walking and running in man: metabolic and mechanical aspects at different grades. *Acta Physiologica Scandinavica*, 150(3), 315-323.
- Montagne, G., Fraise, F., Ripoll, H., & Laurent, M. (2000). Perception-action coupling in an interceptive task: First-order time-to-contact as an input variable. *Human Movement Science* , 19, 59-72.
- Mouchnino, L., Aurenty, R., Massion, J., & Pedotti, A. (1992). Coordination between equilibrium and head-trunk orientation during leg movement: a new strategy build up by training. *Journal of Neurophysiology*, 67, 1587-1598.
- Mourot, L., Bouhaddi, M., Perrey, S., Cappelle, S., Henriët, M., Wolf, J., Rouillon, J., & Regnard, J. (2004). Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincaré plot analysis. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 24(1), 10-18.
- Moxley, S. E. (1979). Schema: the variability of practice hypothesis. *Journal of Motor Behavior* , 11, 65-70.

-
- Myklebust, J. B., Prieto, T., & Myklebust, B. (1995). Evaluation of nonlinear dynamics in postural steadiness time series . *Annals of Biomedical Engineering*, 23, 711-719.
- Nagano, A., & Gerritsen, K. G. M. (2001). Effects of neuromuscular strength training on vertical jumping performance- a computer simulation study. *Journal of Applied Biomechanics*, 17, 113-128.
- Nashner, L. M., & McCollum, G. (1985). The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behavioral and Brain Sciences*, 8, 135-172.
- Navarro, J., & Ros, J. (2002). Qui diu que el caos no te lleis? *Metode*, (35), 45.
- Neumaier, A. (2002). Enfoque científico del entrenamiento de la técnica. J. R. Nitsch, A. Neumaier, H. Marées, & J. Mester *Entrenamiento de la técnica*. Barcelona: Paidotribo.
- Newell, K. M., & Molenaar, P. C. (1998). *Applications of nonlinear dynamics to developmental process modeling*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Newell, K. M., Van Emmerik, R. E. A., Lee, D., & Sprague, R. L. (1993). On postural variability and stability. *Gait and Posture*, 4, 225-230.

- Nitsch, J. R., & Munzert, J. (2002). Aspectos del entrenamiento de la técnica desde la perspectiva de la teoría de la acción. Aproximaciones a un modelo integrador. J. R. Nitsch, A. Neumaier, H. Marées, & J. Mester *Entrenamiento de la técnica* . Barcelona: Paidotribo.
- Nitsch, J. R., & Munzert, J. (2002). Problemas teóricos de la organización del movimiento. J. R. Nitsch, A. Neumaier, H. Marées, & J. Mester *Entrenamiento de la técnica* . Barcelona: Paidotribo.
- Oullier, O., Bardy, B. G., Stoffregen, T. A., & Bootsma, R. J. (2002). Postural coordination in looking and tracking tasks. *Human Movement Science*, 21, 147-167.
- Oullier, O., de Guzmán, G. C., Jantzen, K. J., & Kelso, J. A. S. (2003). The role of spatial configuration and homologous muscle activation in coordination between two individuals. Balagué, N. *Proceedings of the 1st Meeting of Complex Systems and Sport*. Barcelona: International Journal of Computer Science in Sport.
- Pai, Y.-C., & Patton, J. (1997). Center of mass velocity-position predictions for balance control. *Journal of Biomechanics*, 30(4), 347-354.
- Palut, Y., & Zanone, P. (2003). Tennis investigation as a non-linear complex system. Balagué, N: *Proceedings of the 1st Meeting of Complex Systems and Sport*. Barcelona: International Journal of Computer Science in Sport.

-
- Pandy, M. G., & Zajac, F. E. (1991). Optimal muscular coordination strategies for jumping. *Journal of Biomechanics*, 24(1), 1-10.
- Pandy, MG., Zajac, F. E., Sim, E., & Levine, W. S. (1990). An optimal control model for maximum-height human jumping. *Journal of Biomechanics*, 23(12), 1185-1198.
- Parra, M. I., Cuadros, F., Salcedo, M. S., & Gutiérrez, J. R. (2001). Análisis de series temporales del peso de pacientes con trastornos de la conducta alimentaria. *Actas del XXVI Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa Úbeda*.
- Pellecchia, G. L., & Turvey, M. T. (2001). Cognitive activity shifts the attractors of bimanual rhythmic coordination. *Journal of Motor Behavior*, 33(1), 9-15.
- Peper, C. E., Beek, P. J., & Van Wieringen, P. C. W. (1995a). Frequency induced transitions in bimanual tapping. *Biological Cybernetics*, 73, 301-309.
- Peper, C. E., Beek, P. J., & Van Wieringen, P. C. W. (1995b). Multifrequency coordination in bimanual tapping: asymmetrical coupling and signs of supercriticality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 1117-1138.

-
- Peper, C. E., & Carson, R. G. (1999). Bimanual coordination between isometric contractions and rhythmic movements: an asymmetric coupling. *Experimental Brain Research*, 129, 417-432.
- Peper, C. L. E., Ridderikhoff, A., Daffertshofer, A., & Beek, P. J. (2004). Explanatory limitations of the HKB model: Incentives for a two-tiered model of rhythmic interlimb coordination. *Human Movement Science*, 23, 673-697.
- Peper, L., Bootsma, R. J., Mestre, D. R., & Bakker, F. C. (1994). Catching balls: how to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(3), 591-612.
- Perl, J. (2001). PerPot: a Metamodel for simulation of load performance interaction. *Electronic Journal of Sport Science*, (1), 2.
- Perl, J. (2004a). A neural network approach to movement pattern analysis. *Human Movement Science*, 23, 605-620.
- Perl, J. (2004b). PerPot - a meta-model and software tool for analysis and optimisation of load-performance-interaction. *International Journal of Performance Analysis of Sport-e*, 4(2).
- Pew, R. W. (1974). Levels of analysis in motor control. *Brain Research*, 71, 393-400.

- Pigott, R. E., & Shapiro, D. C. (1984). Motor schema: the structure of the variability session. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 55(1), 41-45.
- Potapov, A. (1998). Are RR-Intervals data appropriate to study the dynamics of Heart? G. Meyer-Kress, H. Kantz, & J. Kurths *Nonlinear analysis of physiological data* . Berlin: Springer-Verlag.
- Prigogine, I. (1993). *Las leyes del caos* . Laterza: Drakontos .
- Reed, E. S. (1982). An outline of a theory of action systems. *Journal of Motor Behavior*, 14(2), 98-134.
- Rein, R., & Simon, C. (2003). Influence of technique variation training on technique variability in long distance running. Balagué, N. *Proceedings of the 1st Meeting of Complex Systems and Sport* . Barcelona: International Journal of Computer Science in Sport
- Riba, M., Hurtado, I., Javierre, C., & Balagué, N. (1997). Avaluació fisiològica de competidors d'alt nivell de sports aerobics durant la rutina de competició i test de laboratori. Datos no publicados. INEFC Barcelona, Facultat de Medicina, Universitat de Barcelona.
- Riccio, G. E. (1993). Information in movement variability about the qualitative dynamics of posture and orientation. K. M. Newell, & D. M. Corcos *Variability and Motor Control* . Champaign IL: Human Kinetics.

- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1988). Affordances as constraints on the control of stance. *Human Movement Science*, 7, 265-300.
- Riera, J. (1985). *Introducción a la psicología del deporte*. Barcelona: Ediciones Martínez Roca, S.A.
- Riera, J., & Cruz, J. (1991). Psicología del deporte: Valoración de las tendencias actuales y propuestas de desarrollo futuro. J. Riera, & J. Cruz *Psicología del deporte. Aplicaciones y perspectivas*. Barcelona: Ediciones Martínez Roca, S.A.
- Riera, J., & Gordillo, A. (1982). Relación entre la frecuencia cardiaca y el inicio del movimiento durante el aprendizaje y ante el estrés. *Apunts d'Educació Física i Medicina Esportiva*, 19(73), 49-59.
- Riera, J., & Gordillo, A. (1983). Relaciones observadas en l'aprenentatge d'un llançament de precisió. *Apunts D'Educació Física i Medicina Esportiva*, 20, 99-105.
- Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2002). Variability and determinism in motor behavior. *Journal of Motor Behavior*, 34(2), 99-125.
- Robertson, S. D. (1999). The development of bimanual coordination: The effect of rate on the stability of coordination. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 21, S89.

- Robertson, S. D. (2001). Development of bimanual skill: the search for stable patterns of coordination. *Journal of Motor Behavior*, 33(2), 114-126.
- Romero, D. (2003). *Análisis biomecánico de la fatiga muscular como etiología de la alteración de la coordinación neuromotriz en jóvenes sedentarios*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Ruiz Perez, L. M. (1998). La variabilidad en el aprendizaje deportivo. Vol. 3, 11. Lecturas: educación física y deportes, revista digital.
- Ruiz Pérez, L. M., & Sánchez Banuelos, F. (1997). *Rendimiento deportivo*. Madrid: Gymnos.
- Rutherford, O. M., Greig, C. A., Sargeant, A. J., & Jones, D. A. (1986). Strength training and power output: Transference effects in the human quadriceps muscle. *Journal of Sports Sciences*, 4, 101-107.
- Sale, D., & MacDougall, D. (1981). Specificity in strength training: a review for the coach and athlete. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*, 6(2), 87-92.
- Salesse, R., Temprado, J. J., & Semjen, A. (2003). Visual basis of the dynamics of hand-foot coordination. W. I. Schöllhorn, C. Bohn, J. M. Jäger, H. Schaper, & M. Alichmann *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology* . Köln: Sport Buch Strauss.

- Sandroni, P., & Young, R. R. (1994). Tremor: diagnosis and management. *American Family Physician, 50*, 1505-1512.
- Santello, M., McDonagh, M. J. N., & Challis, J. H. (2001). Visual and non-visual control of landing movements in humans. *Journal of Physiology, 537*(1), 313-327.
- Schiek, M., Drepper, F. R., Engbert, R., Abel, H. H., & Suder, K. (1998). Cardiorespiratory Synchronization. G. Meyer-Kress, H. Kantz, & J. Kurths *Nonlinear analysis of physiological data*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schmidt, R. A. (1982). *Motor control and learning. A behavioural emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A. (1975). *Motor Skills*. New York: Harper & Row.
- Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison of Intra- and Interpersonal interlimb coordination: coordination breakdown and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 24*(3), 884-900.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16*(2), 227-247.

-
- Schmidt, R. C., & Fitzpatrick, P. (1996). Dynamical perspective on motor learning. H. N. Zelaznik *Advances in motor learning and control* . Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. C., & O'Brien, B. (1997). Evaluating the dynamics of nonintentional interpersonal coordination. *Ecological Psychology*, 9, 189-206.
- Schmidt, R. C., O'Brien B. , & Sysko, R. (1999). Self-organization of between-persons cooperative tasks and possible applications to sport. *International Journal of Sport Psychology* , 30, 558-579.
- Schmidt, R. C., Treffner, P. J., Shaw, B. K., & Turvey, M. T. (1992). Dynamical aspects of learning an interlimb rhythmic movement pattern. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 67-83.
- Schmidt, R. C., & Turvey, M. T. (1994). Phase-entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements. *Biological Cybernetics*, 70 , 369-376.
- Schneider, E., & Chao, E. Y. (1983). Fourier analysis of ground reaction forces in normal patients with knee joint disease. *Journal of Biomechanics*, 16(8), 591-601.
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1999). Dynamic encounters: long memory during functional stabilization. *Ecological Psychology*, 11(2), 103-137.

-
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1990). Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns. *Journal of Motor Behavior*, 22, 98-124.
- Schoz, J. P., Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1987). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion: critical slowing down and switching time. *Physics Letters*, A123, 390-394.
- Schöllhorn, W. (1998). Motor learning and motor control. *International Coaching Symposium Taiwan*.
- Schöllhorn, W. (1999). Individualität-ein vernachlässigter parameter? *Leistungssport*, 29(2), 4-11.
- Schöllhorn W. I. (2000). Applications of systems dynamic principles in technique and strength training. *Acta Academiae Olympique Estonia*, 8, 67-85.
- Schöllhorn, W. I. (2004). Applications of artificial neural nets in clinical biomechanics. *Clinical Biomechanics*, 19(9), 876-898.
- Schöllhorn, W. I., & Bauer, H. U. (1998). Identifying individual movement styles performance sports by means of self organizing kohonen maps. XVI *International Symposium on biomechanics in sports. Proceedings*. Konstanz.

- Schöllhorn, W. I., Nigg, B. M., Stefanyshyn, D., & Liu, W. (2002). Identification of individual walking patterns using time discrete and time continuous data sets. *Gait and Posture*, *15*(2), 180-186.
- Schöllhorn, W., Röber, F., Jaitner, T., Hellstern, W., & Käubler, W. (2001). Discrete and continuous effects of traditional and differential sprint training. *6th Annual Congress of the European College of Sport Sciences* Colonia: Sport und Buch Strauss GmbH.
- Schöner, G. (1990). A dynamic theory of coordination of discrete movement. *Biological Cybernetics*, *63*, 257-270.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988). Dynamic patterns generation in behavioral and neural systems. *Science*, *239*, 1513-1519.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. I. Relative phase dynamics. *Biological Cybernetics*, *58*, 71-80.
- Schönherr, T., & Schöllhorn, W. I. (2003). Diferencial learning in basketball. Schöllhorn, W. I., Bohn, C., Jäger, J. M., Schaper, H., & Alichmann, M. *European workshop on movement science- Mechanics, Physiology, Psychology* Cologne: Sport Buch Strauss.

- Seals, D. R., & Chase, P. B. (1989). Influence of physical training on heart rate variability and baroreflex circulatory control. *Journal of Applied Physiology*, 66, 1886-1895.
- Seirul.lo, F. (1992). Valores educativos del deporte. *Revista de Educación Física*, (44), 3-11.
- Selles, R. W., Wagenaar, R. C., Smit, T. H., & Wuisman, P. I. (2001). Disorders in trunk rotation during walking in patients with low back pain: a dynamical systems approach. *Clinical Biomechanics*, 16(3), 175-181.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1998). *The mathematical theory of communication* . USA: University of Illinois Press.
- Shea, C. H., & Kohl, R. M. (1990). Specificity and variability of practice . *Research Quarterly for Exercise and Sport* , 61, 169-177.
- Shea, J. B., & Morgan, R. L. (1979). Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 5, 179-187.
- Shi, X., Stevens, G. H., Foresman, B. H., Stern, S. A., & Raven, P. B. (1995). Autonomic nervous system control of the heart: endurance exercise training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27, 1406-1413.
- Siff, M. C., & Verchoshansky, Y. (1999). *Superentrenamiento*. Barcelona: Paidotribo.

- Skinner, J. E., Zebrowski, J. J., & Kowalik, Z. J. (1998). Low-dimensional chaos in heartbeats. G. Meyer-Kress, H. Kantz, & J. B. S.-V. Kurths *Nonlinear analysis of physiological data*. Berlin: Springer-Verlag.
- Smith, R. E. (1988). The logic and design of case study research. *The Sport Psychologist*, 2, 1-12.
- Solé, J. (1995). *Visión y deporte: Propuesta metodológica específica e integradora*. Tesis doctoral, INEFC; Universitat de Barcelona, Barcelona
- Solé, J. (2002). *Fundamentos del entrenamiento deportivo. Libro de ejercicios*. Barcelona : Ergo .
- Souchard, P. E. (1996). *Stretching global activo (de la perfección muscular a los resultados deportivos)*. Barcelona : Paidotribo.
- Spägele, T., Kistner, A., & Gollhofer, A. (1999). Modelling, simulation and optimisation of a human vertical jump. *Journal of Biomechanics*, 32, 521-530.
- Stergiou, N., Buzzi, U.H., Kurz, M.J., & Heidel, J. (2004). Nonlinear tools in human movement. Stergiou, N. *Innovative analyses of human movement*. USA: Human Kinetics.
- Stergiou, N., Jensen, J. L., Bates, B. T., Scholten, S. D., & Tzetzis, G. (2001a). A dynamical systems investigation of lower extremity coordination during running over obstacles. *Clinical Biomechanics*, 16, 213-221.

- Stergiou, N., Scholten, S. D., Jensen, J. L., & Blanke, D. (2001b). Intralimb coordination following obstacle clearance during running: the effect of obstacle height. *Gait and Posture*, *13*, 210-220.
- Sternad, D. (1999). Juggling and bouncing balls: parallels and differences in dynamic concepts and tools. *International Journal of Sport Psychology*, *30*, 462-489.
- Sternad, D., Dean, W. J., & Schaal, S. (2000). Interaction of rhythmic and discrete pattern generators in single-joint movement. *Human Movement Science*, *19*, 627-664.
- Sternad, D., Saltzman, E. L., & Turvey, M. T. (1998). Interlimb coupling in a simple serial behavior: a task dynamic approach. *Human Movement Science*, *17*, 393-433.
- Sternad, D., Turvey, M. T., & Saltzman, E. L. (1999). Dynamics of 1:2 coordination: generalizing relative phase to n:m rhythms. *Journal of Motor Behavior*, *21*(3), 207-223.
- Stirling, J. R., & Zakyntinaki, M. S. (2004). Stability and the maintenance of balance following a perturbation from quiet stance. *Chaos*, *14*(1), 96-105.
- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. USA, MA: Addison-Wesley Publishing Company.

-
- Summers, J. (2004). The cognitivist's revenge? *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 392-394.
- Swinnen, S. P., Li, Y., Wenderoth, N., Byblow, W., Stinar, C., Dounskaia, N., & Wagemans, J. (2004). Perception-Action coupling during bimanual coordination: the role of visual perception in the coalition of constraints that govern bimanual action. *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 394-398.
- Taga, G. (1995). A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. *Biological Cybernetics*, 73, 97-111.
- Temprado, J. J. (2000). Inter-joint coordination subserving the volley-ball serve: a dynamical approach to expertise. *Congres International de la SFPS-Paris INSEP 2000- Symposia*.
- Temprado, J. J., & Laurent, M. (1999). Perceptuo-motor coordination in sport: current trends and controversies. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 417-436.
- Temprado, J. J., Monno, A., Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (2002). Attentional demands reflect learning-induced alterations of bimanual coordination dynamics. *European Journal of Neuroscience*, 16, 1390-1394.
- Temprado, J. J., & Salesse, R. (2004). Interlimb coordination: real constraints and false dichotomies. *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 398-400.

-
- Thaut, M. H., Rathbun, J. A., & Miller, R. A. (1997). Music versus metronome timekeeper in a rhythmic motor task. *International Journal of Arts Medicine*, 5(1), 4-12.
- Thelen, E., Corbetta, D., Kamm, K., Spencer, J., Schneider, K., & Zernicke, R. F. (1993). The transition to reaching: mapping intention and intrinsic dynamics. *Child Development*, 64, 1058-1098.
- Thelen, E., Corbetta, D., & Spencer, J. P. (1996). Development of reaching during the first year: role of movement speed. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(5), 1059-1076.
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1998). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge: Bradford Book MIT Press.
- Thom, R. (1975). *Structural stability and morphogenesis*. Hardcover.
- Thomas, J. R., & Nelson, J. K. (1990). *Research methods in physical activity*. Champaign, Illinois: Human Kinetics books.
- Torrents, C., & Balagué, N. (2001a). La perspectiva de la teoría de los sistemas dinámicos y su aplicación al aprendizaje motor. *Tándem*, (3), 67-74.
- Torrents, C., & Balagué, N. (2001b). Hábitos de entrenamiento de los competidores españoles de aeróbic deportivo. *VI Simposium de Actividades Gimnásticas* Barcelona: INEFC .

- Torrents, C., Peralta, M., Marina, M., & Balagué, N. (1999). Valoración de la fuerza del tren inferior aplicada al salto y de la fuerza del tren superior aplicada a las flexiones en gimnastas e instructores de aeróbic . *4art congrés de les ciencies de l'esport, l'educació física i la recreació de l'INEFC de Lleida* Lleida: INEFC .
- Torrents, C., Stirling, J., Zakythinaki, M., & Balagué, N. (2002). Nonlinear dynamics in vertical jumping. *7th Annual Congress of the European Congress of Sport Sciences. Proceedings*. Atenas: University of Athens.
- Tous, J. (1999). *Nuevas tendencias en fuerza y musculación*. Barcelona: Ergo.
- Treffner, P. J., & Kelso, J. A. S. (1999). Dynamic encounters:long memory during functional stabilization. *Ecological Psychology*, 11(2), 103-137.
- Trockel, M., & Schöllhorn, W. I. (2003). Diferencial training in soccer. Schöllhorn, W. I., Bohn, C., Jäger, J. M., Schaper, H., & Alichmann, M. *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology*. Köln: Sport Buch Strauss.
- Tshciene, P. (2002). Algunos aspectos de la preparación a la competición. La preparación a la competición según un enfoque basado en la teoría de los sistemas. *Revista de Entrenamiento Deportivo*, 4, 5-15.

- Turvey, M. T., Holt, K. G., LaFiandra, M. E., & Fonseca, S. T. (1999). Can the transitions to and from running and the metabolic cost of running be determined from the kinetic energy of running? *Journal of Motor Behavior*, 31(3), 265-278.
- Ulrich, B. D., Ulrich, D. A., & Angulo-Kinzler, R. M. (1998). The impact of context manipulations on movement patterns during a transition period . *Human Movement Science*, 17, 327-346.
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2000). Amplitude changes in the 8-12, 20-25, and 40 Hz oscillations in finger tremor. *Clinical Neurophysiology* , 111, 1792-1801.
- Van Emmerik R.E.A., & Wagenaar, R. C. (1996). Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking. *Journal of Biomechanics*, 29, 1175-1184.
- Van Rossum, J. H. A. (2000). Deliberate practice and dutch field hockey: an addendum to starkes. *International Journal of Sport Psychology*, 31, 452-460.
- Vereijken, B., van Emmerick, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992). Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 24, 133-42.

- Vereijken, B., & Whiting, H. T. A. (1990). In defence of discovery learning. *Canadian Journal of Sports Sciences*, 15(2), 99-106.
- Verheul, M. (2004). *Constraints on coordination. Intrinsic dynamics, behavioral information and asymmetry in bimanual rhythmic coordination*. Tesis doctoral, Rijksuniversiteit Groningen, Groningen.
- Vernetta, M., Bedoya, J. L., & Panadero, F. (2000). *Unidades didácticas para secundaria XI. Habilidades gimnásticas: minicircuitos*. Barcelona: Inde.
- Viitasalo, J. T., & Gajewski, J. (1994). Effects of strength training-induced fatigue on tremor spectrum in elbow flexion. *Human Movement Science*, 13, 129-141.
- Vogt, S., Stadler, M., & Kruse, P. (1988). Self-organization aspects in the temporal formation of movement gestalts. *Human Movement Science*, 7, 365-406.
- Voss, A., Wessel, N., Kleiner, H. J., Kurths, J., & Dietz, R (1997). Nonlinear dynamics in cardiovascular diseases. *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications*, 30(2), 935-941.
- Vuillerme, N., Danion, F., Marin, L., Boyadjian, A., Prieur, J. M., Weise, I., & Nougier, V. (2001). The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neuroscience Letters*, 303(2), 83-86.

- Wagner, H., Müller, E., Kösters, A., Von Tschärner, V., & Brunner, F. (2003). Optimisation of complex movement patterns (handball throw) motor development and the variation of kinematic and EMG parameters. *8th annual congress of the ECSS Salzburg*: University of Salzburg.
- Walter, C. B., & Gravenhorst, R. M. (2004). Placing the perceptual-cognitive approach in perspective. *Journal of Motor Behavior*, 36(4), 400-402.
- Walter, C. B., & Swinnen, S. P. (1992). Adaptive tuning of interlimb attraction to facilitate bimanual decoupling. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 95-104.
- Walter, C. B., Swinnen, S. P., & Dounskaia, N. V. (2002). Generation of bimanual trajectories of disparate eccentricity: levels of interference and spontaneous changes over practice. *Journal of Motor Behavior*, 34(2), 183-195.
- Walter, C. B., Swinnen, S. P., & Franz, E. A. (1993). Stability of symmetric and asymmetric discrete bimanual actions. K. M. Newell, & D. M. Corcos *Variability and motor control*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Weaver, W. (1974). Las matemáticas de la comunicación. R. Carnap, & Morgenstern *Matemáticas en las ciencias del comportamiento*. Madrid: Alianza Universidad.

- Webber, C. L., Schmidt, M. A., & Walsh, J. M. (1995). Influence of isometric loading on biceps EMG dynamics as assessed by linear and nonlinear tools. *Journal of Applied Physiology*, 78(3), 814-822.
- Weir, J. P., Housh T.J. , & Weir, L. L. (1994). Electromyographic evaluation of joint angle specificity and cross-training after isometric training. *Journal of Applied Physiology*, 77, 197-201.
- Wenderoth, N., & Bock, O. (2001). Performance and acquisition of bimanual coordination patterns are influenced by spatial and muscular constraints. *Actas del 6th Annual Congress of the European College of Sport Science*.
- Wiener, N. (1974). Cibernética. R. Carnap, & Morgenstern *Matemáticas en las ciencias del comportamiento* . Madrid: Alianza Universidad .
- Wiener N. (1961). *Cybernetics* . USA: Massachusetts Institute of Technology .
- Williams, K., Gill, D. L., Kovacs, C., & Williams, L. (2003). Intralimb co-ordination of older adults during stair climbing and descent: fallers and non-fallers. *Journal of Human Movement Studies*, (45), 233-255.
- Wimmers, R. H., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. W. (1992). Phase transitions in rhythmic tracking movements: A case of unilateral coupling . *Human Movement Science*, 11, 217-226.
- Winfree, A. T. (1967) Biological rhythms and the behavior of population of coupled oscillators. *Journal of theoretical biology*, 16, 15-42

-
- Winter, D. A., Prince, F., Frank, J. S., Powell, C., & Zabjek, K. F. (1996). Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neuroscience*, 75(6), 2334-2343.
- Wrisberg, C. A., Winter, T. P., & Kuhlman, J. S. (1987). The variability of practice hypothesis: further tests and methodological discussion . *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 58, 369-373.
- Wulf, G., & Prinz, W. (2001). Directing attention to movement effects enhances learning: A review. *Psychonomic Bulletin and Review*, 8 , 648-660.
- Wulf, G., & Schmidt, R. A. (1988). Variability in practice: facilitation in retention and transfer through schema formation or context effects. *Journal of Motor Behavior* , 20, 133-149.
- Yamamoto, K., Miyachi, M., Saitoh, T., Yoshioka, A., & Onodera, S. (2001). Effects of endurance training on resting and post-exercise cardiac autonomic control. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33, 1496-1502.
- Yarrow, K., Brown, P., Gresty, M. A., & Bronstein, A. M. (2001). Force platform recordings in the diagnosis of primary orthostatic tremor. *Gait and Posture* , 13, 27-34.
- Young, A. (1984). The relative isometric strength of type I and type II muscle fibers in the human quadriceps. *Clinical Physiological*, 4, 23-32.

Zakynthinaki, M., Stirling, J., Torrents, C., & Balagué, N. Nonlinear dynamics in muscular failure. *7th Annual Congress of the European College of Sport Sciences Atenas*.

Zanone, P. G. (2003). A dynamic model of learning: stability, symmetry, and attention. Schöllhorn, W. I., Bohn, C., Jäger, J. M., Schaper, H., & Alichmann, M. *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology* Köln: Sport Buch Strauss.

Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. s. (1992). Evolution of behavioural attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(2), 403-421.

Zintl, F. (1991). *Entrenamiento de la resistencia*. Barcelona: Martínez Roca.

ANEXO 1

VALORACIÓN DEL ENTRENAMIENTO

$(n \cdot Nrep \cdot Irel) / t$

n= Número de series

Nrep= Número de repeticiones o variaciones por serie

Irel= Intensidad relativa*

t= Tiempo que tarda en realizar el ejercicio

*Intensidad relativa:

- En el trabajo de pesas será el 1% del máximo dividido por 100. Se realizará un test mensual de cada ejercicio.
- En las flexiones, saltos y demás dificultades se seguirá un orden de dificultad en función de la superficie de trabajo, la base de sustentación, el tipo de dificultad y la ayuda recibida, tal y como se muestra en los siguientes cuadros:

Flexiones

Tipo	Con ayuda	Sin ayuda	dislocada sin ayuda	dislocada con ayuda
2 brazos pectoral	0,6	0,7	0,8	0,9
2 brazos tríceps	0,7	0,8	0,9	1
1 brazo pectoral	0,8	0,9	1	1,1
1 brazo tríceps	0,9	1	1,1	1,2
1 brazo/1pie pectoral	1	1,1	1,2	1,3
1 brazo/1pie tríceps	1,1	1,2	1,3	1,4
Con repulsión + 0,1				

Helicóptero 2 brazos: 1

Helicóptero 1 brazo: 1,2

Caídas de 2 brazos sin salto: 0,8

Caídas de dos brazos con salto: 1

Flexiones en paralelas de pectoral: 0,8

Flexiones en paralelas de tríceps: 0,9

Wenson: 1,3

Fondos de tríceps: 0,7

Desequilibrios de dorsal no máx: 0,5

Desequilibrios dorsal máximo: 0,8

Verticales en suelo o paralelas: 0,2

Verticales en anillas: 0,5

Oímpicas: 0,7

Vertical un brazo en pared: 0,5

Flexiones en vertical con ayuda: 0,9

Flexiones en vertical sin ayuda: 1

Escuadras en suelo o paralelas: 0,5

Escuadras en anillas: 0,8

Uves en suelo o paralelas: 0,8

Uves en anillas: 1

Saltos

Superficie salto	Con ayuda	Sin ayuda
Cama elástica	0,1	0,4
trumbling	0,3	0,5
Suelo artística	0,4	0,6
Tatami	0,5	0,7
Suelo duro	0,6	0,8
Colchoneta	0,7	0,9
quitamiedos	0,8	1
Desde altura +1		

PROTOCOLO DE LOS TESTS SEMANALES

CALENTAMIENTO

- Correr 5' (últimos 2' movilización de brazos)
- 1' de carrera elevando rodillas y talones
- 25 rebotes en fondo de piernas lateral y frontal
- 10 lanzamientos con cada pierna lateral y frontal
- Espagats: 30" con pierna derecha, 30" con pierna izquierda y 30" frontal
- Estirar pectoral y tríceps 30"
- 10 abducciones de piernas en tendido supino
- 2 x 4 kicks frontales
- 2 x 4 kicks laterales
- 5 saltos con impulso
- 2 carpas
- 10 flexiones de brazos de pectoral

TEST

Se realizarán 3 repeticiones de cada dificultad descansando aproximadamente 3' entre una y otra:

- Carpa: Realizar un paso a caer con pies juntos sobre la plataforma, realizar la carpa y volver a caer con pies juntos volviendo a saltar posteriormente.
- Carpa con ½ giro: Mismo protocolo que anterior pero realizando ½ giro en el aire antes de abrir las piernas.
- Salto en espagat: Mismo protocolo que los anteriores pero saltando en espagat.
- Flexión del brazo derecho: Los pies estarán separados a la distancia de los hombros más 5 cms de cada lado y la mano derecha en el centro de la plataforma. Se flexionará el brazo derecho hasta superar los 90° manteniendo la línea de los hombros paralela con el suelo. Las piernas y el brazo libre no se flexionarán. La cabeza se mantendrá alineada con la columna vertebral. Se ejecutará la flexo-extensión a la máxima velocidad.
- Flexión del brazo izquierdo: Mismo protocolo que anterior pero con el brazo izquierdo.
- Flexión dislocada: Mismo protocolo que anteriores pero en el momento de máxima flexión del brazo el codo caerá al suelo para

volver a la posición de máxima flexión y extender el brazo posteriormente.

ANEXO 2

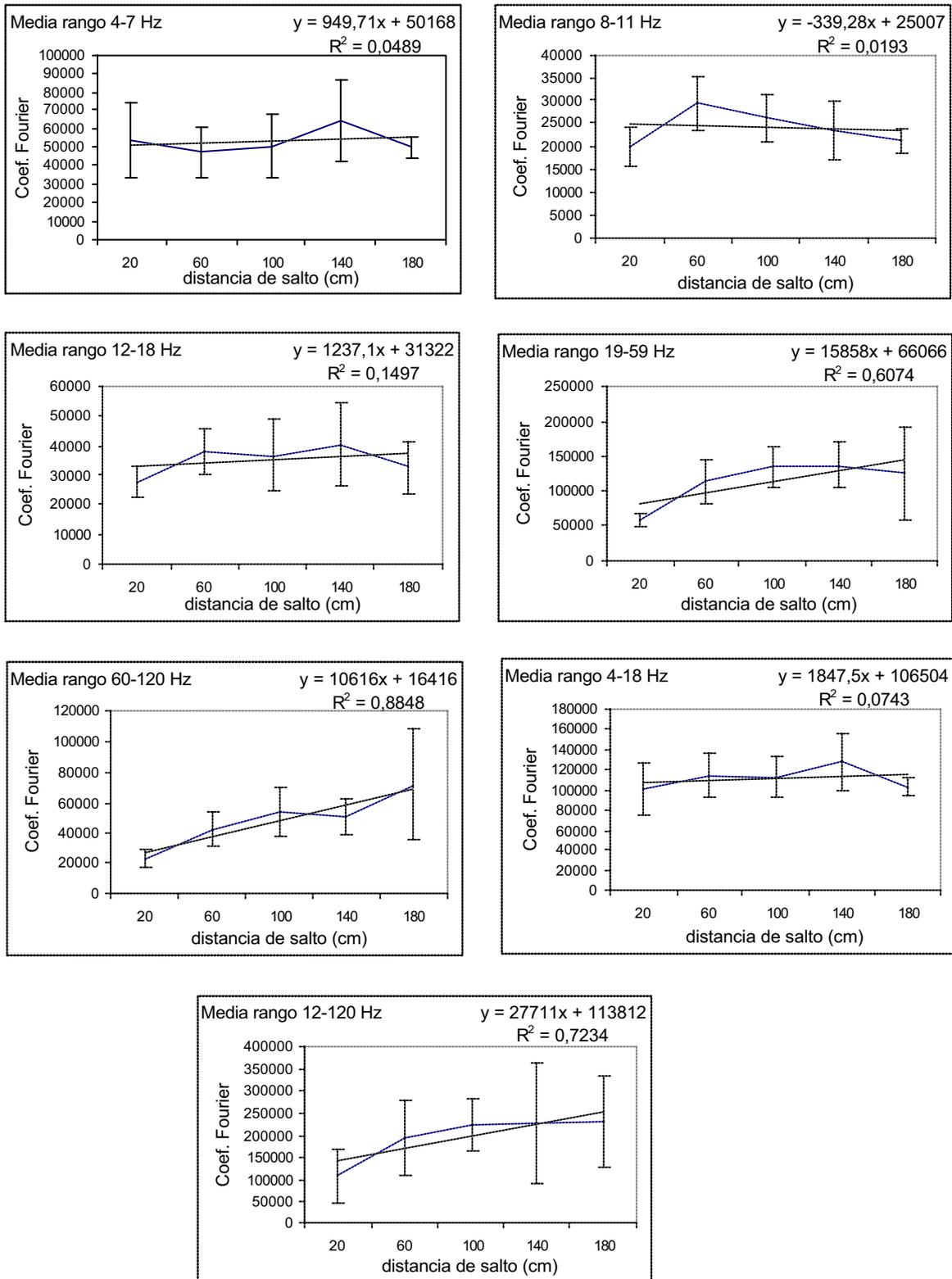


Fig. a1 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente mediolateral de la fuerza (FX) de las series temporales completas del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

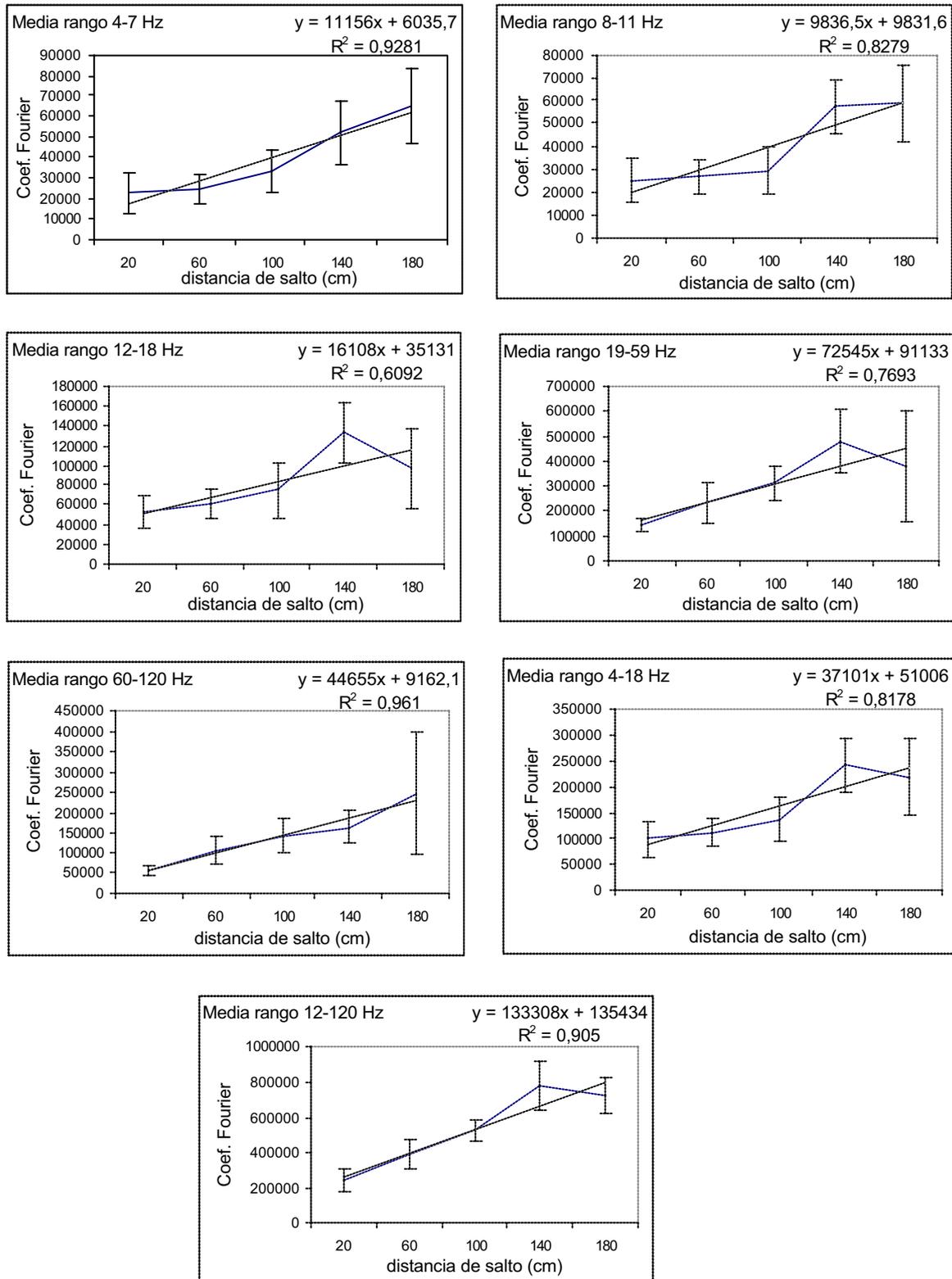


Fig. a2 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente mediolateral de la fuerza (FX) del primer tercio las series temporales del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

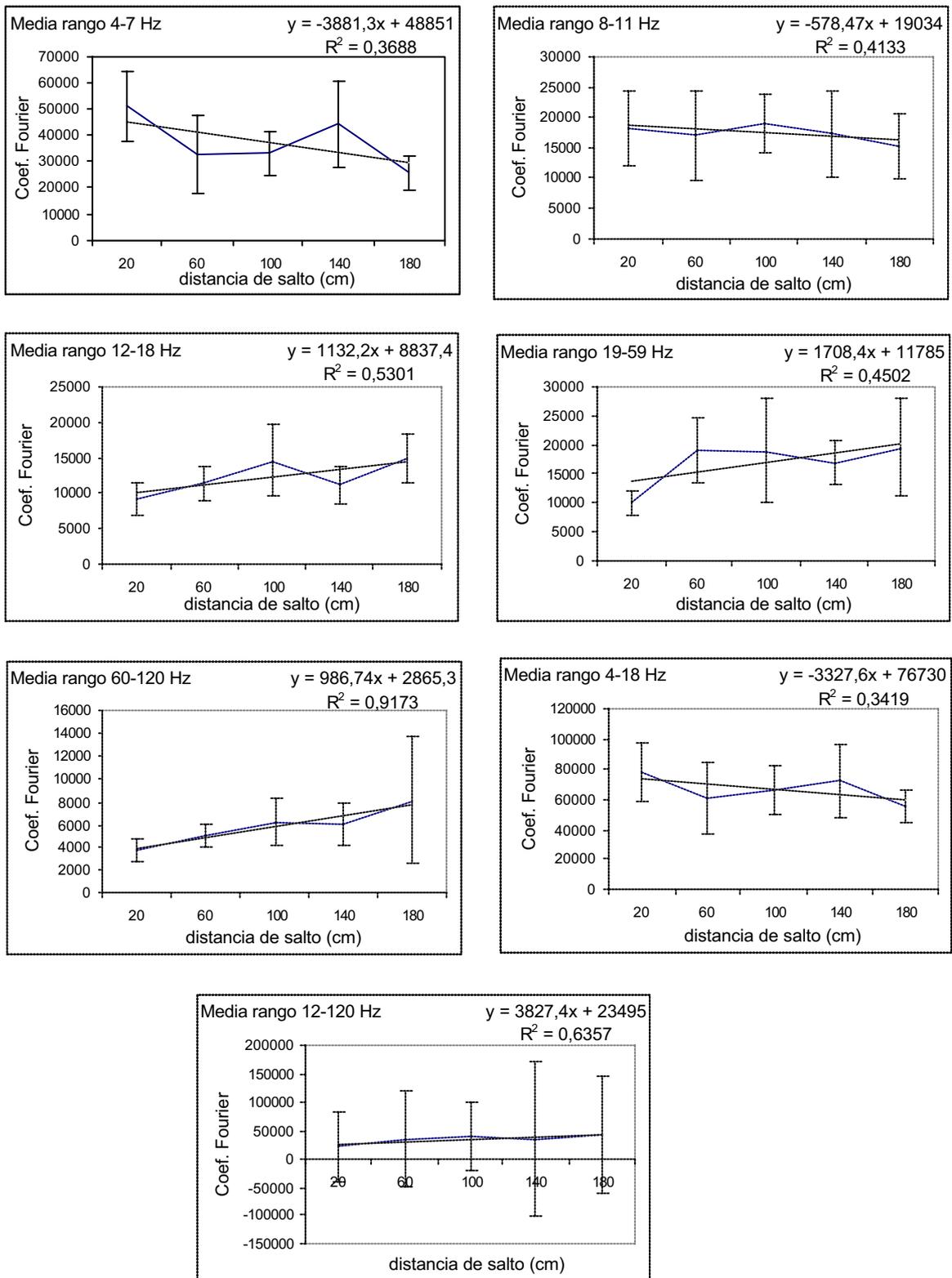


Fig. a3 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente mediolateral de la fuerza (FX) de los dos últimos tercios de las series temporales del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

* p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

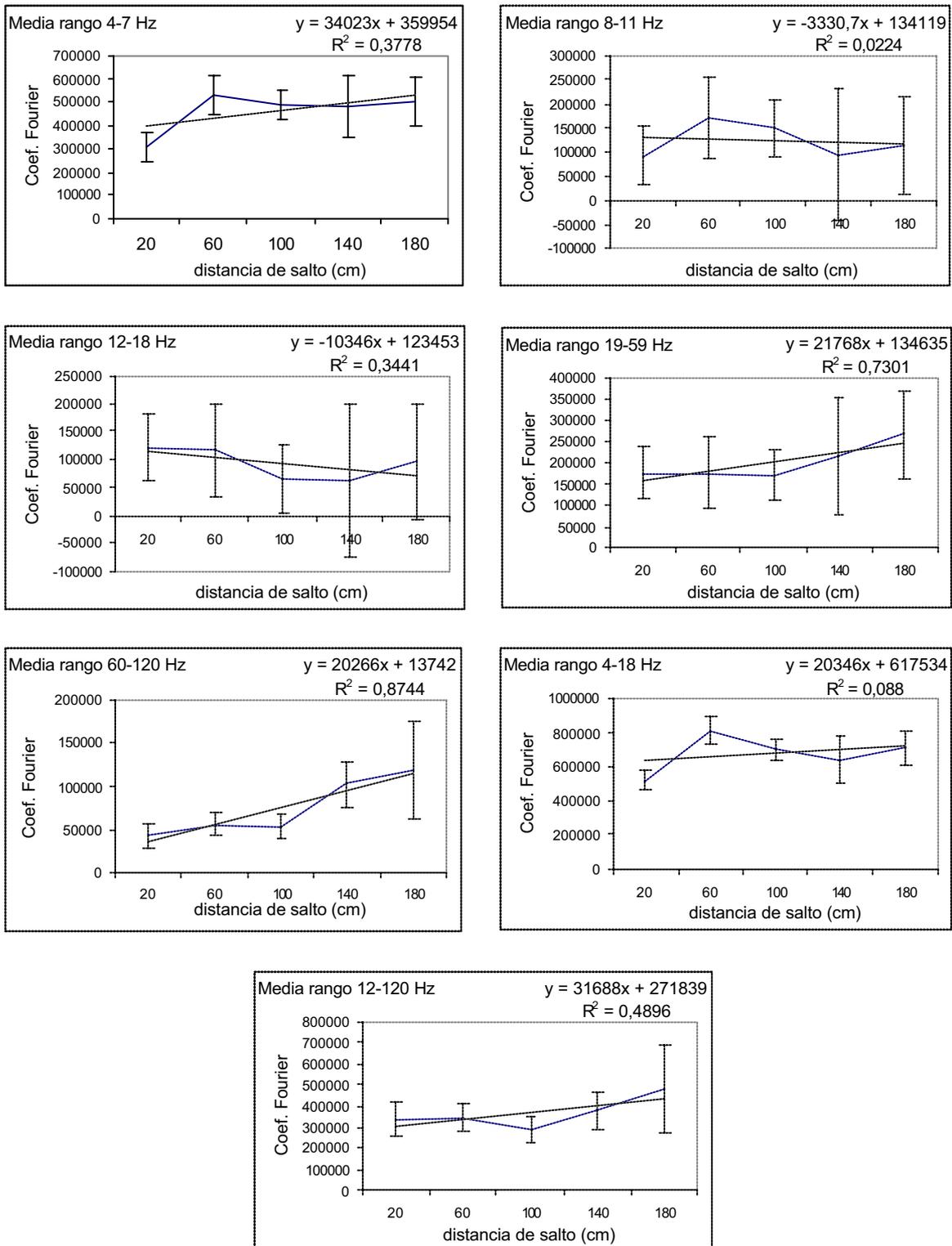


Fig. a4 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente anteroposterior de la fuerza (F_y) de las series temporales completas del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

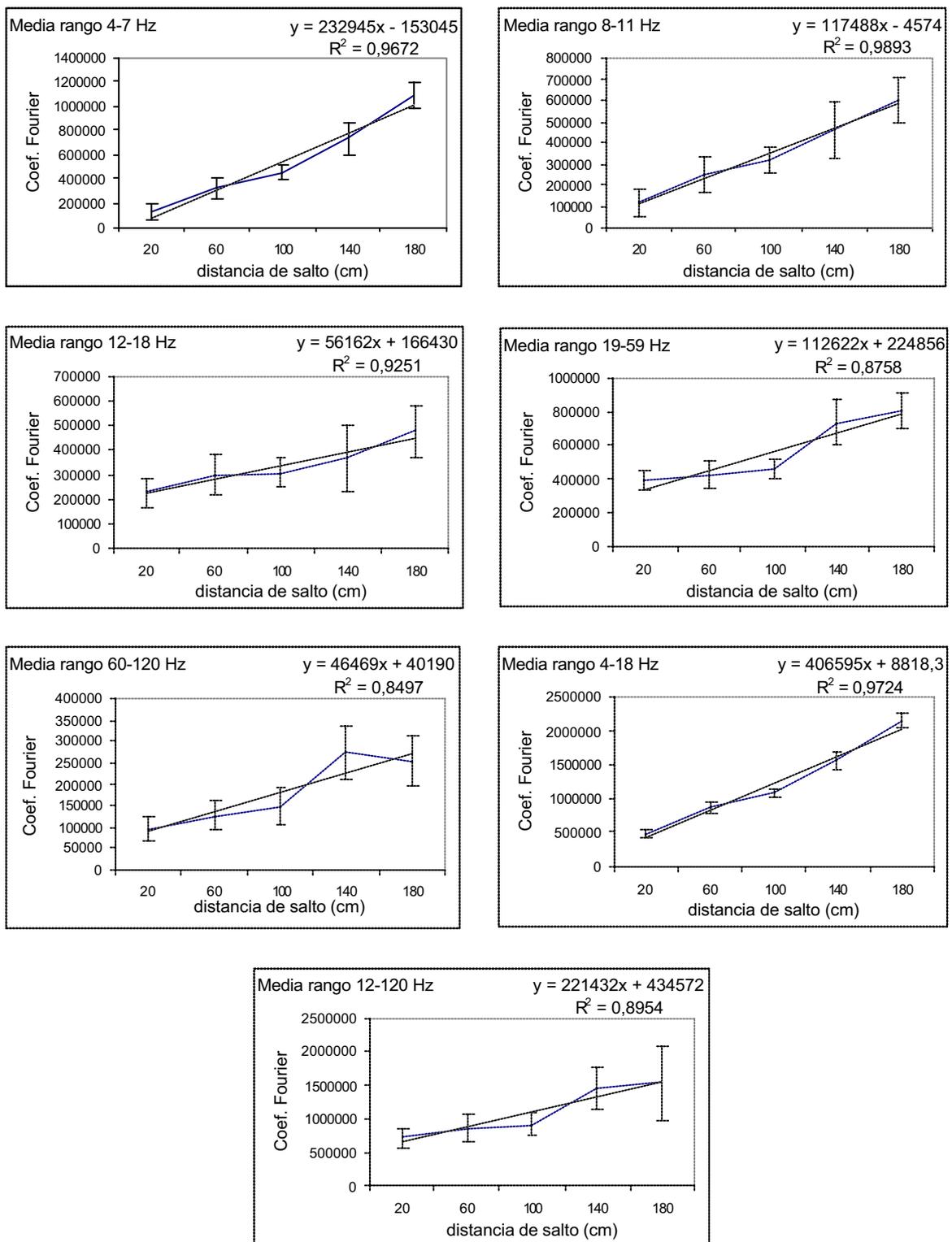


Fig. a5 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del primer tercio de las series temporales del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

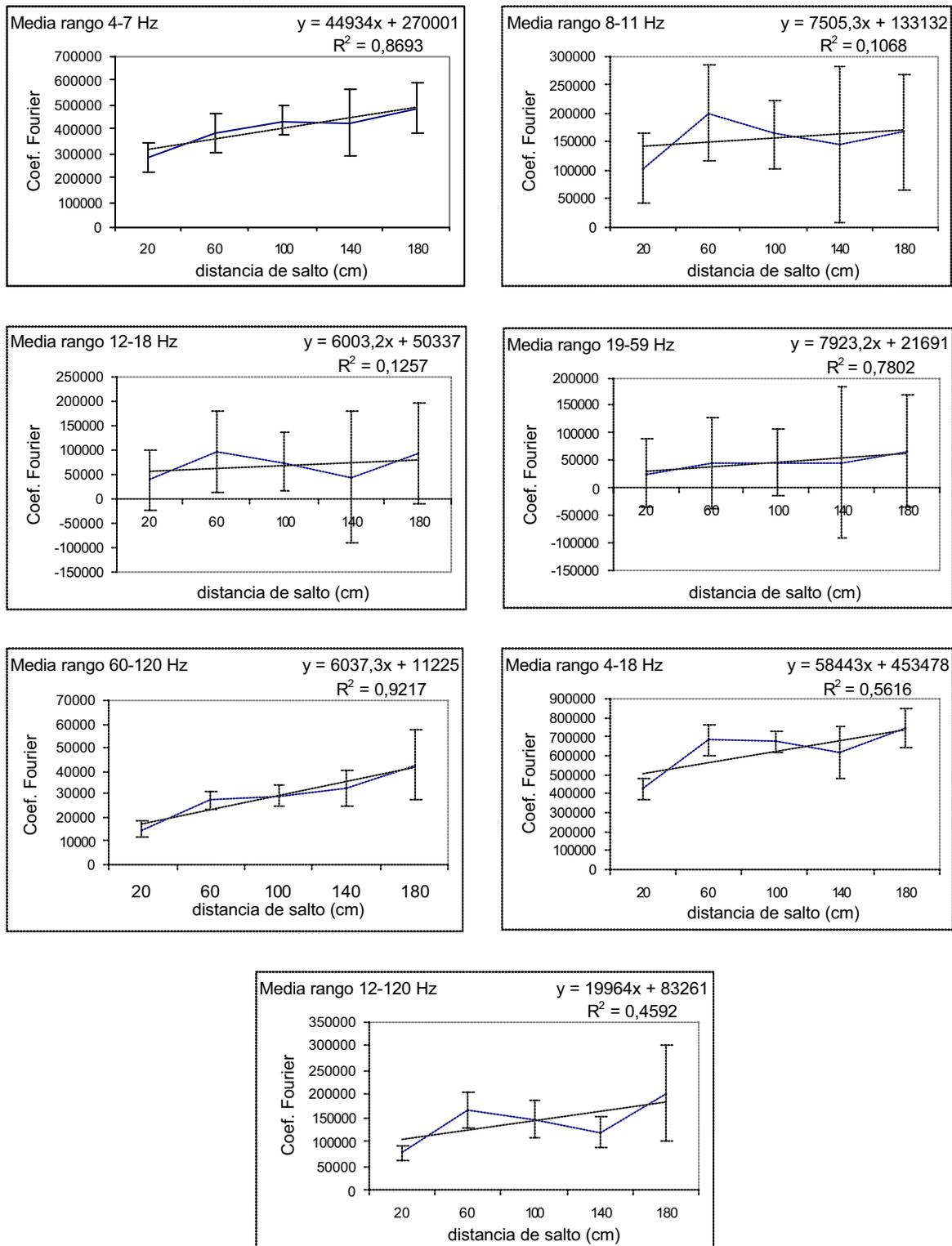


Fig. a6 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente anteroposterior de la fuerza (F_y) de los dos últimos tercios de las series temporales del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

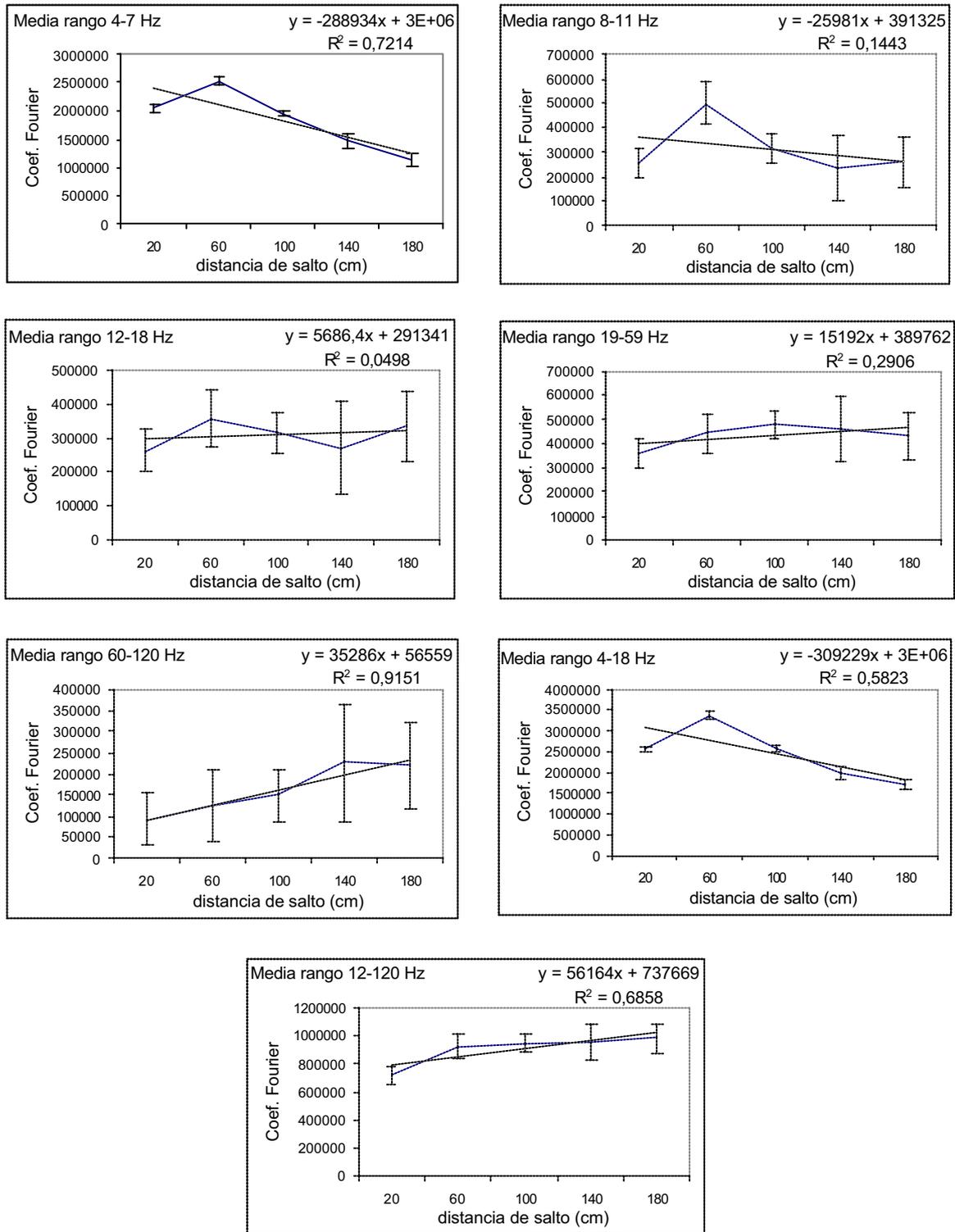


Fig. a7 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente vertical de la fuerza (F_z) de las series temporales completas del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

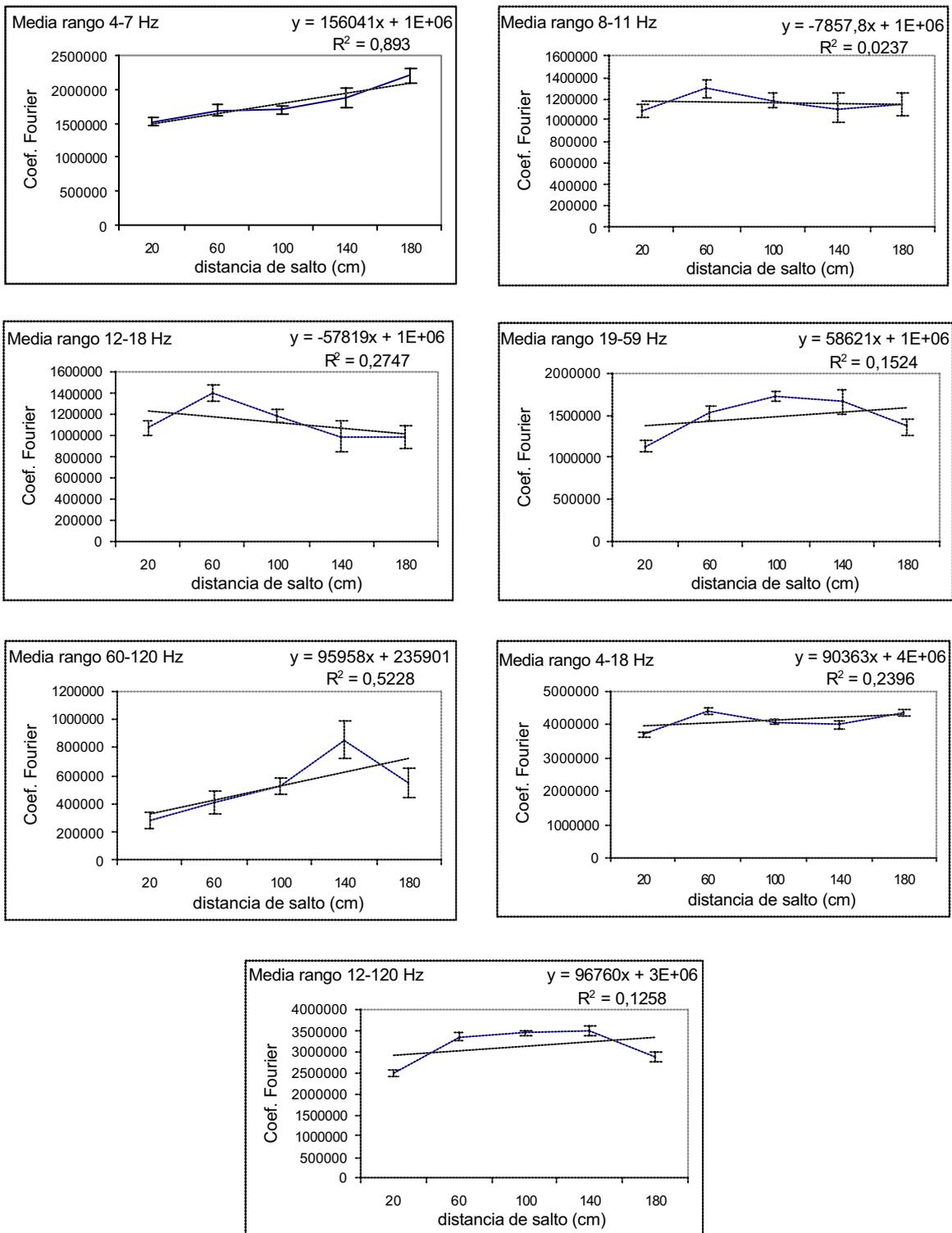


Fig. a8 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente vertical de la fuerza (Fz) del primer tercio de las series temporales del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

* p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

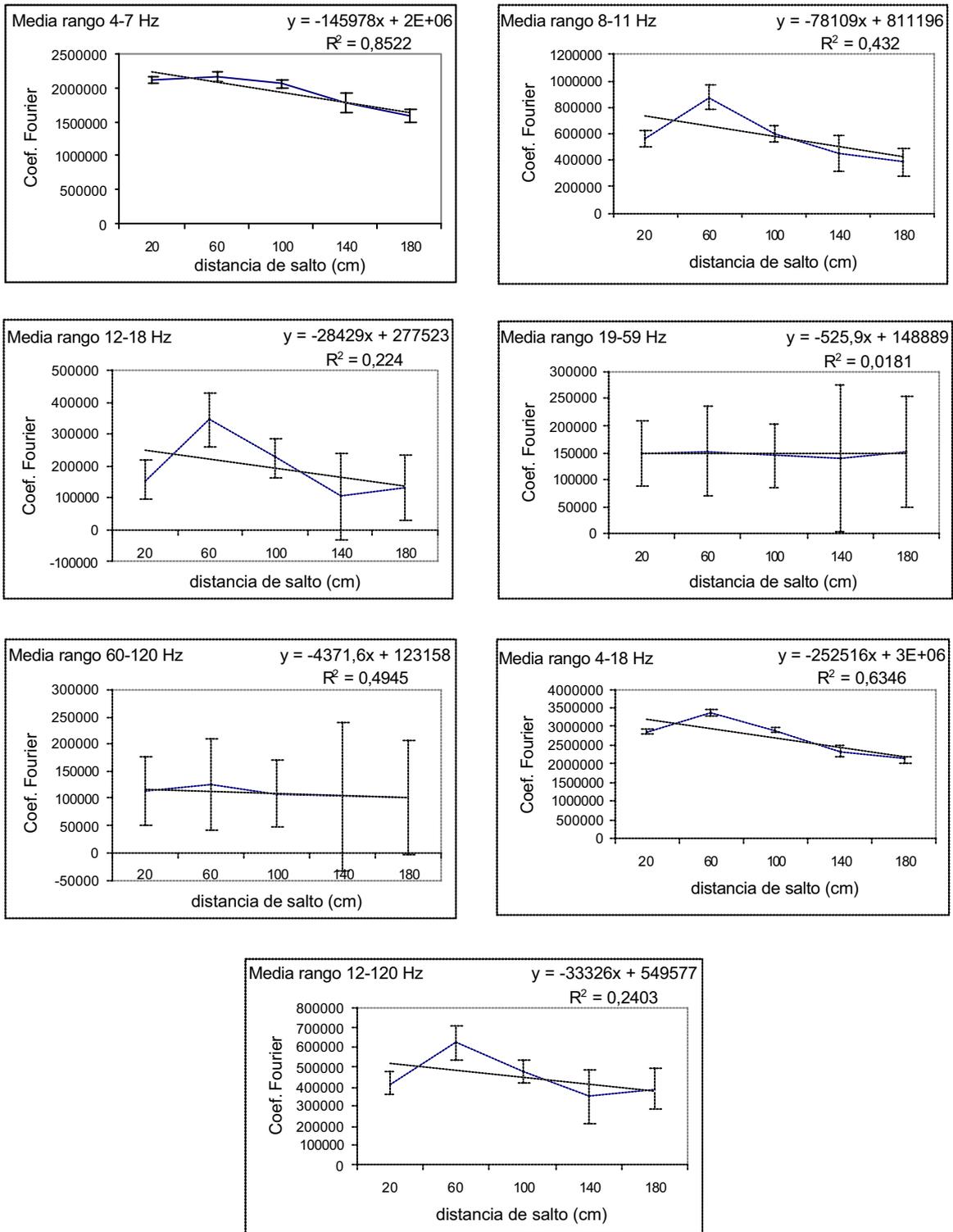


Fig. a9 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente vertical de la fuerza (Fz) de los dos últimos tercios de las series temporales del estudio 2.A en función de la distancia de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

* p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

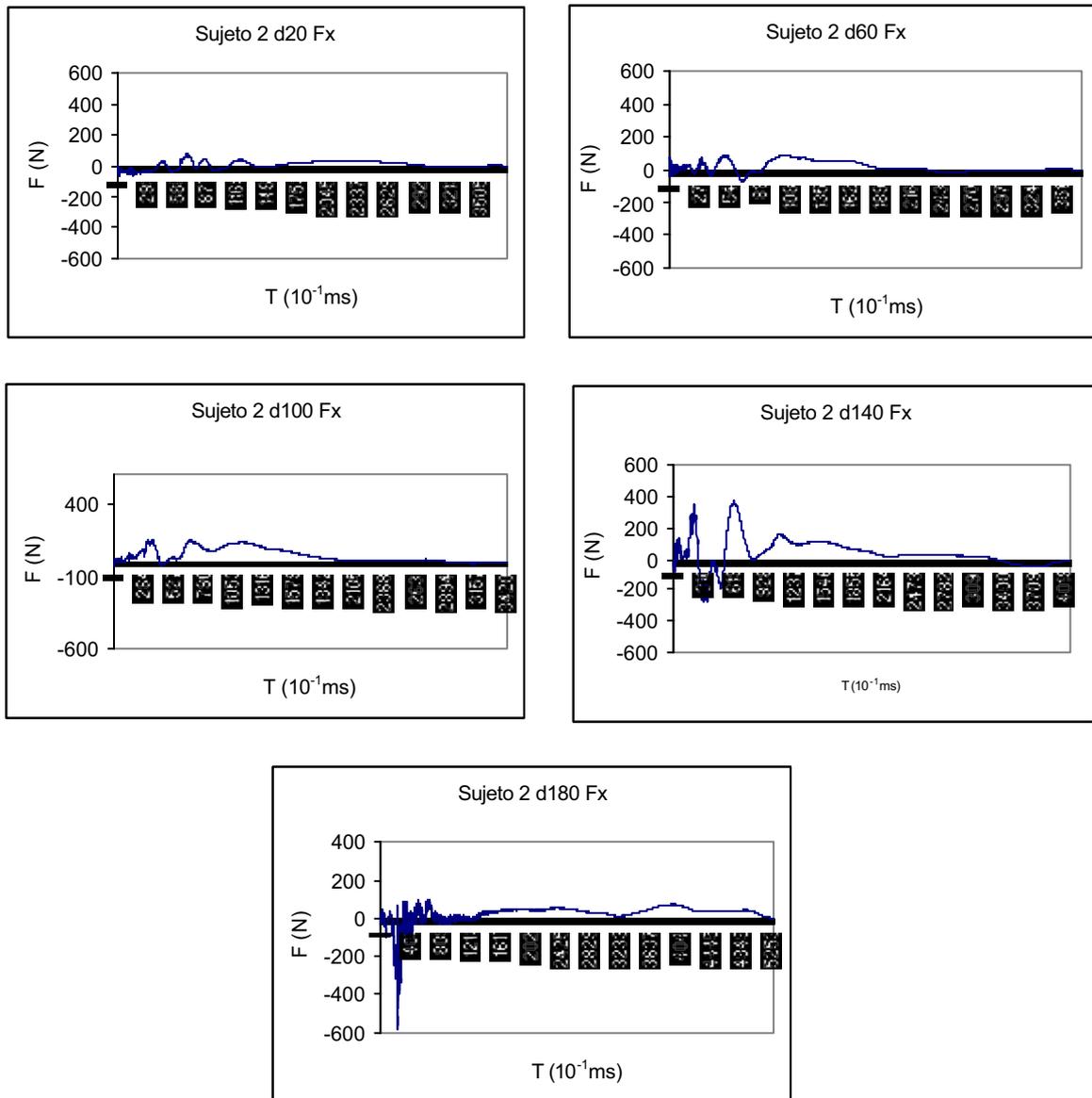


Fig. a10 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 2 en los saltos del estudio 2.A.

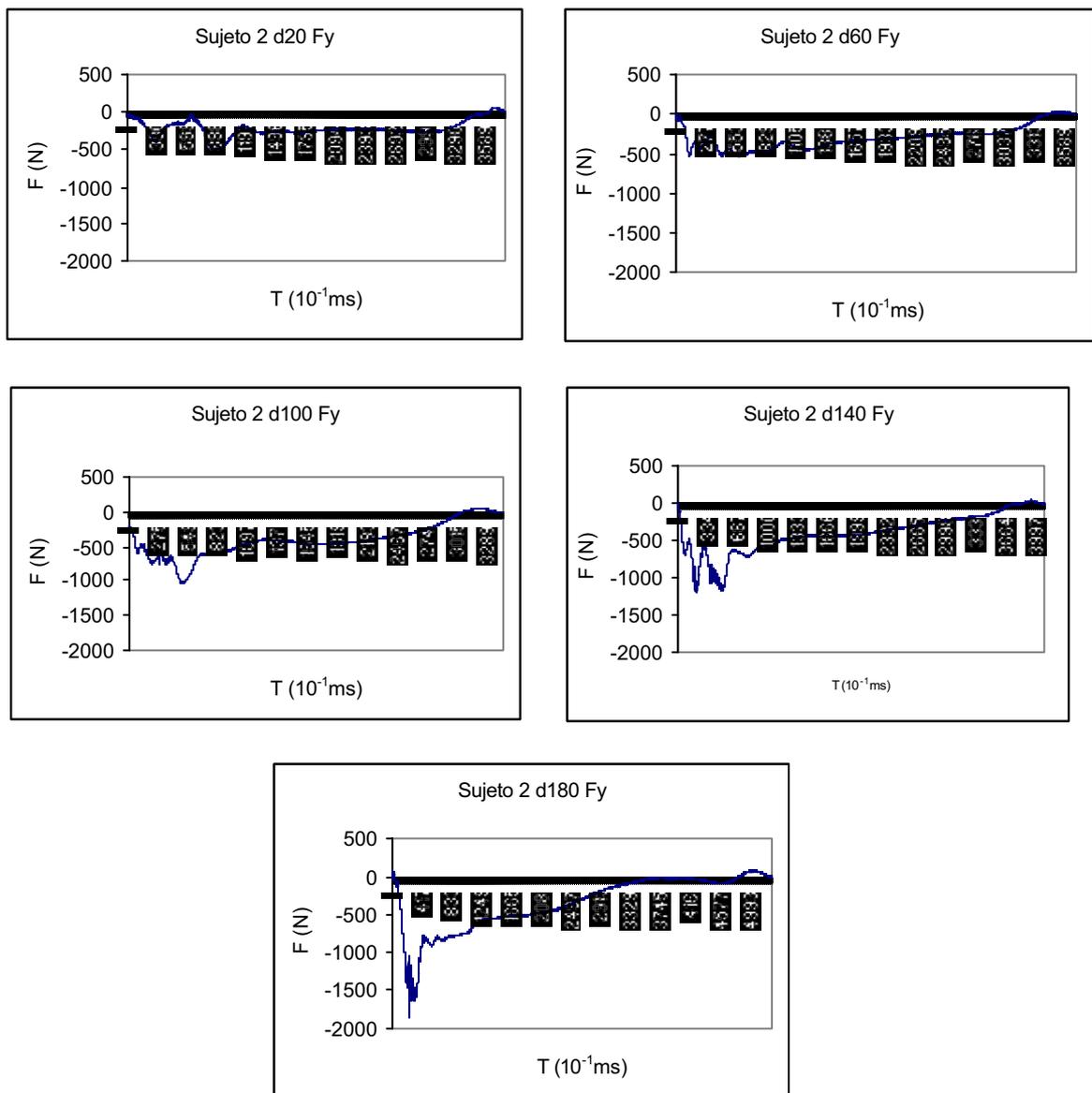


Fig. a11 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 2 en los saltos del estudio 2.A.

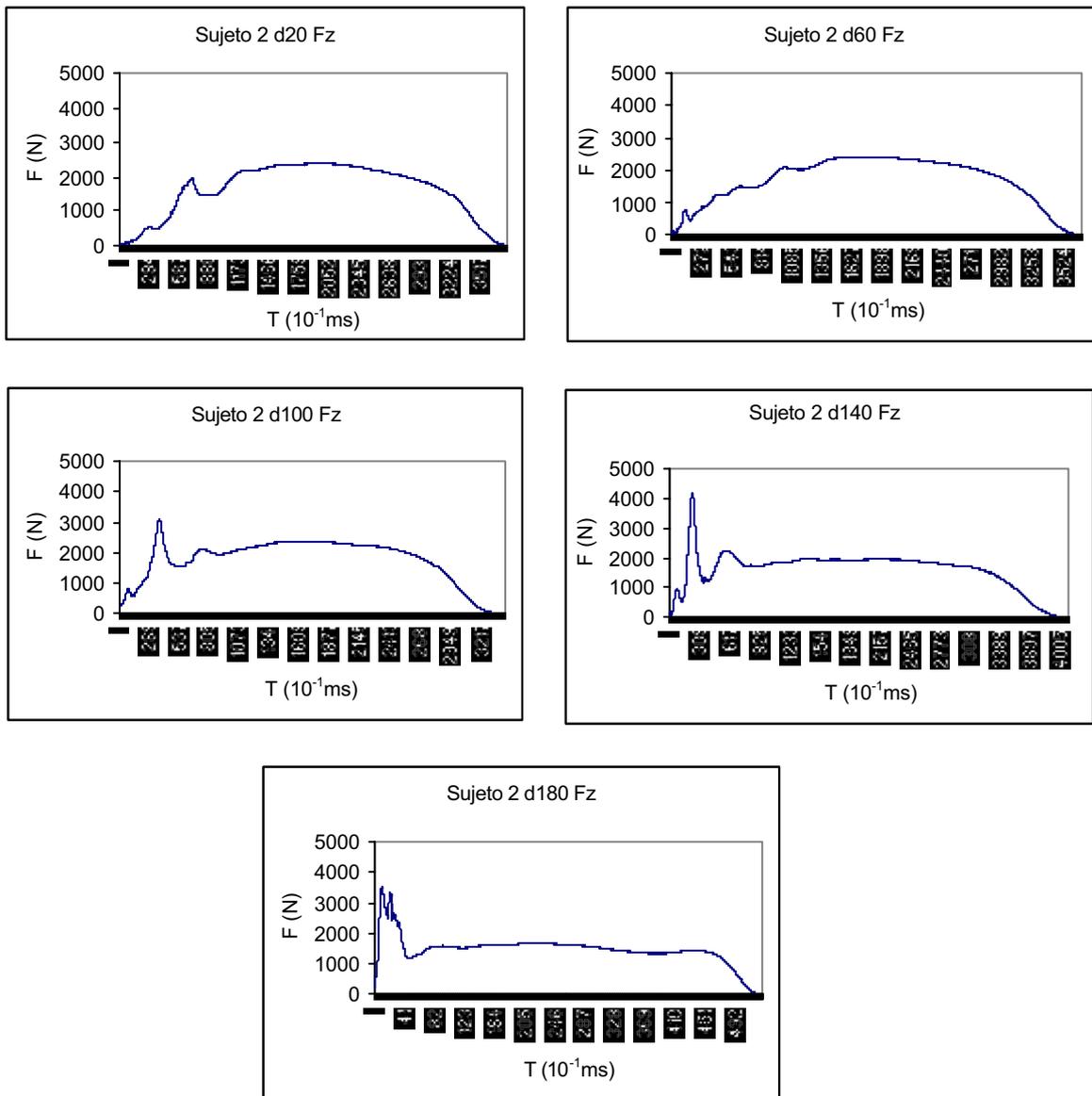


Fig. a12 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 2 en los saltos del estudio 2.A.

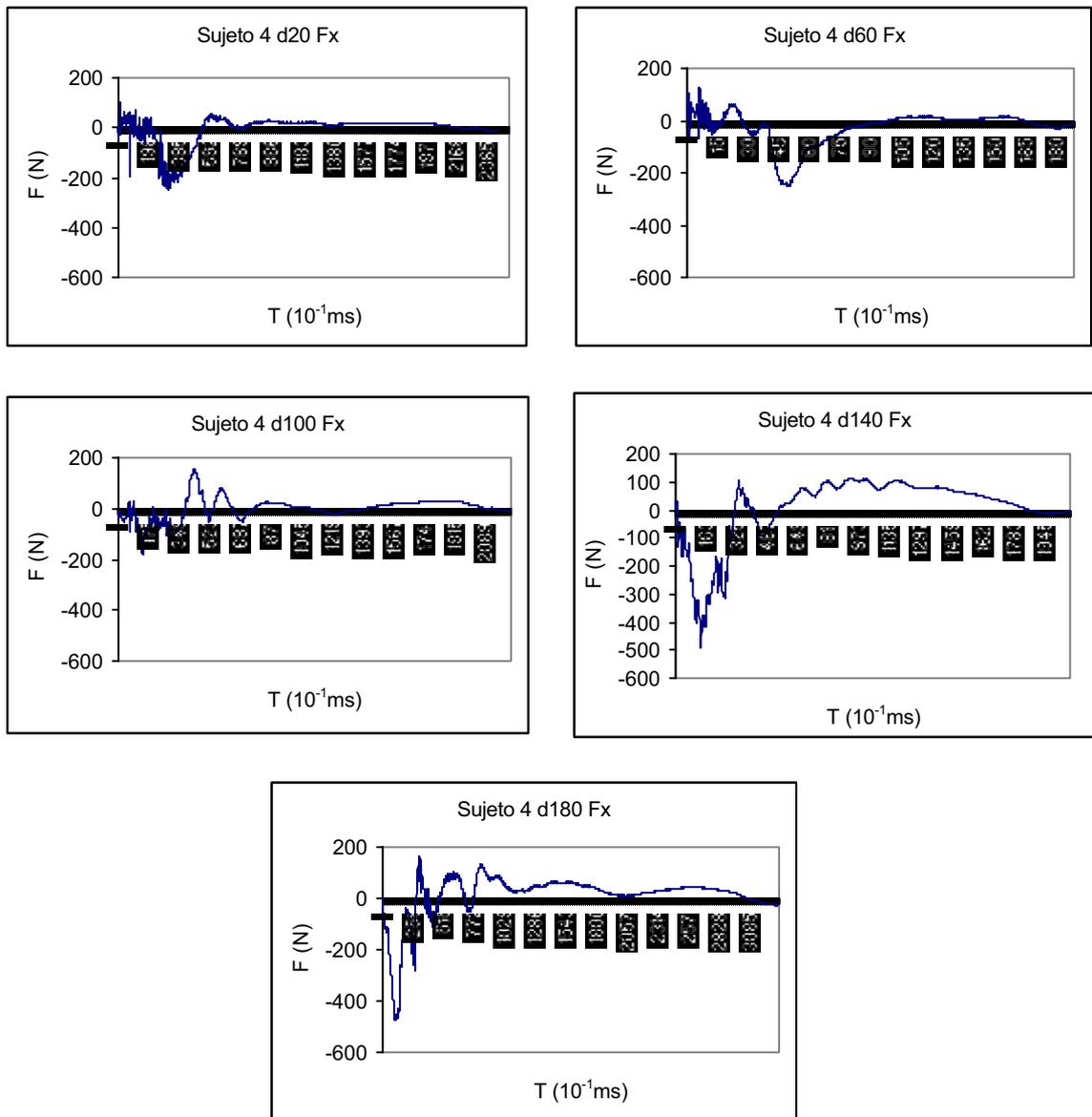


Fig. a13 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 3 en los saltos del estudio 2.A.

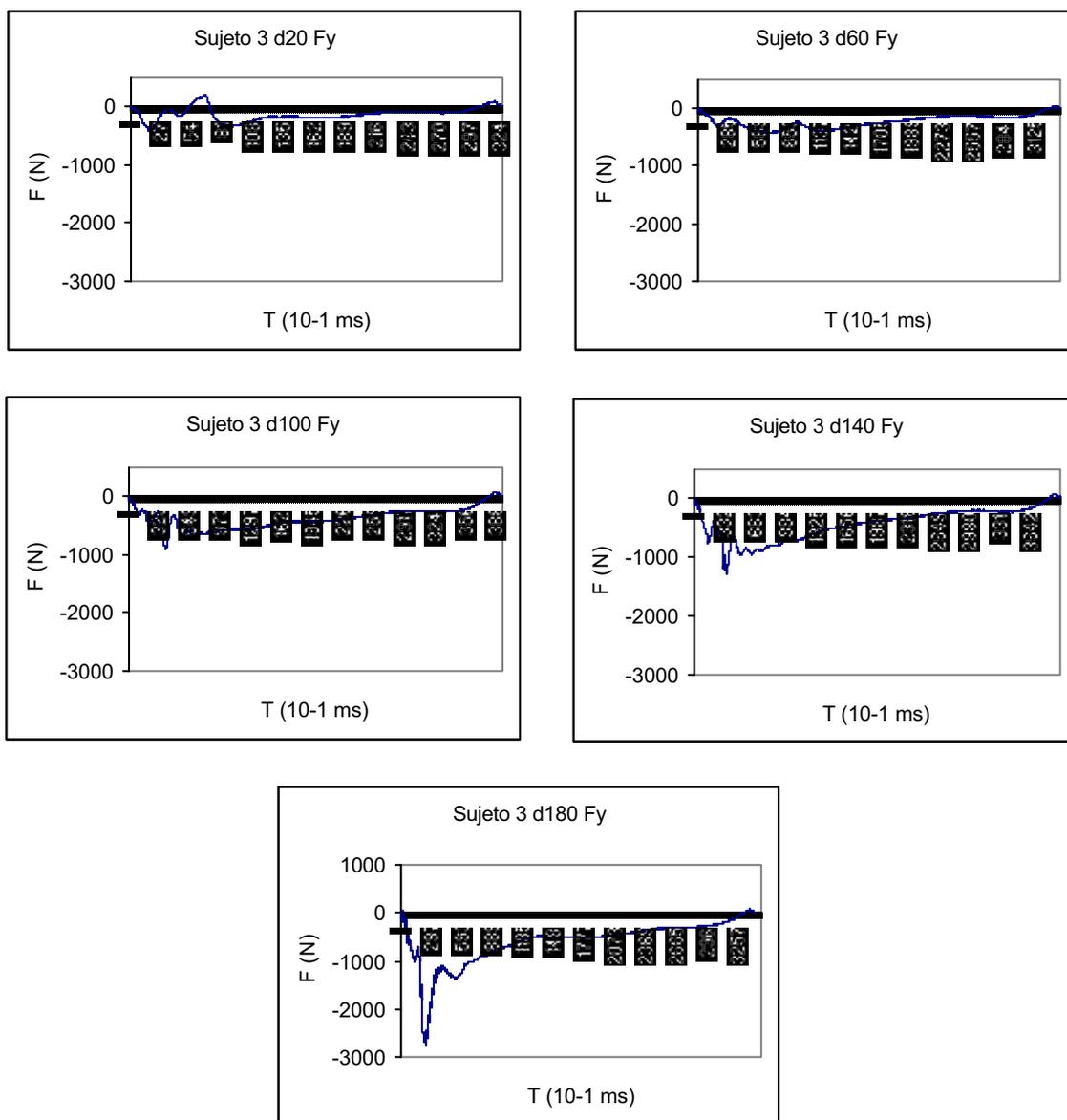


Fig. a14 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 3 en los saltos del estudio 2.A.

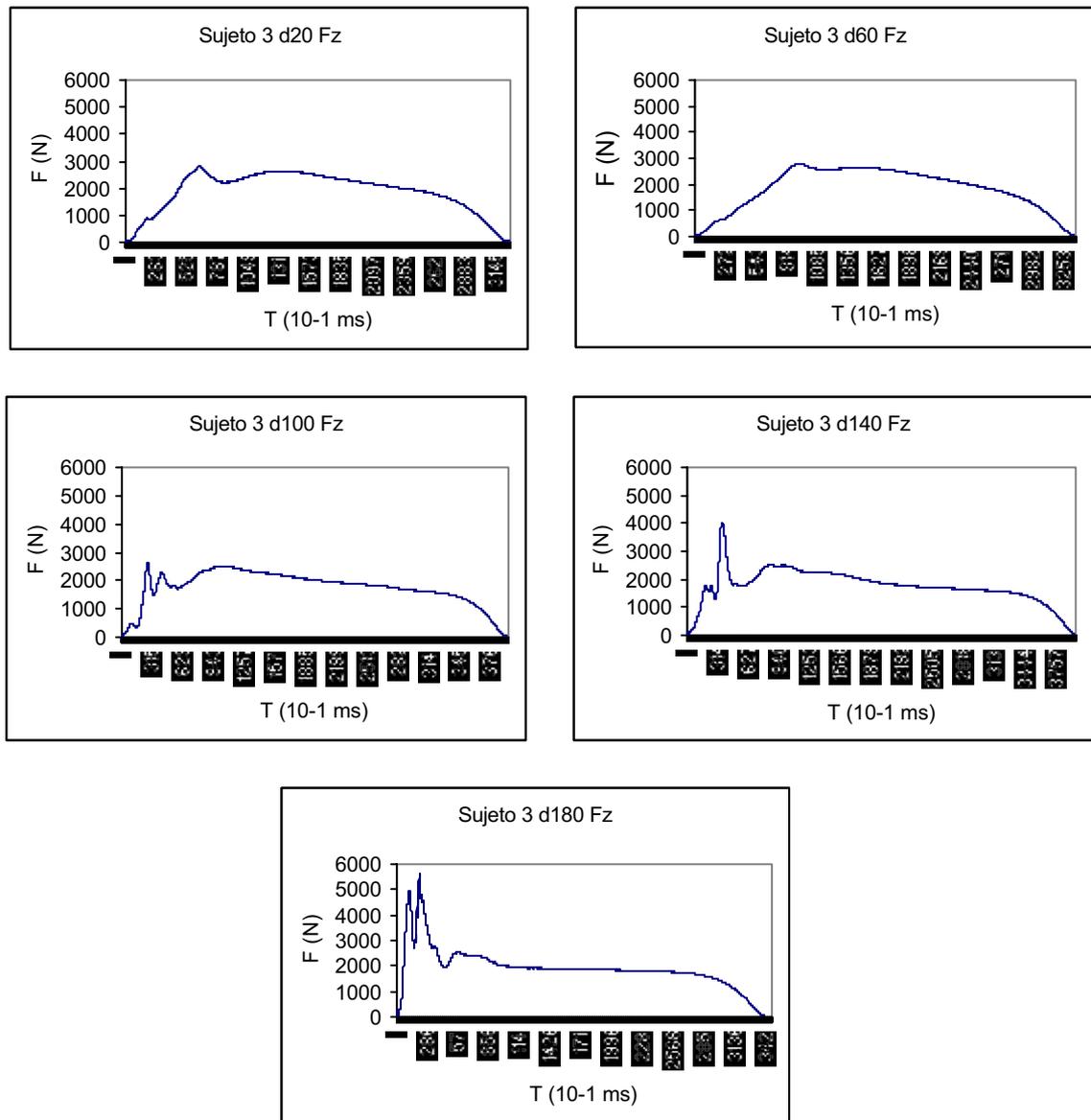


Fig. a15 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 3 en los saltos del estudio 2.A.

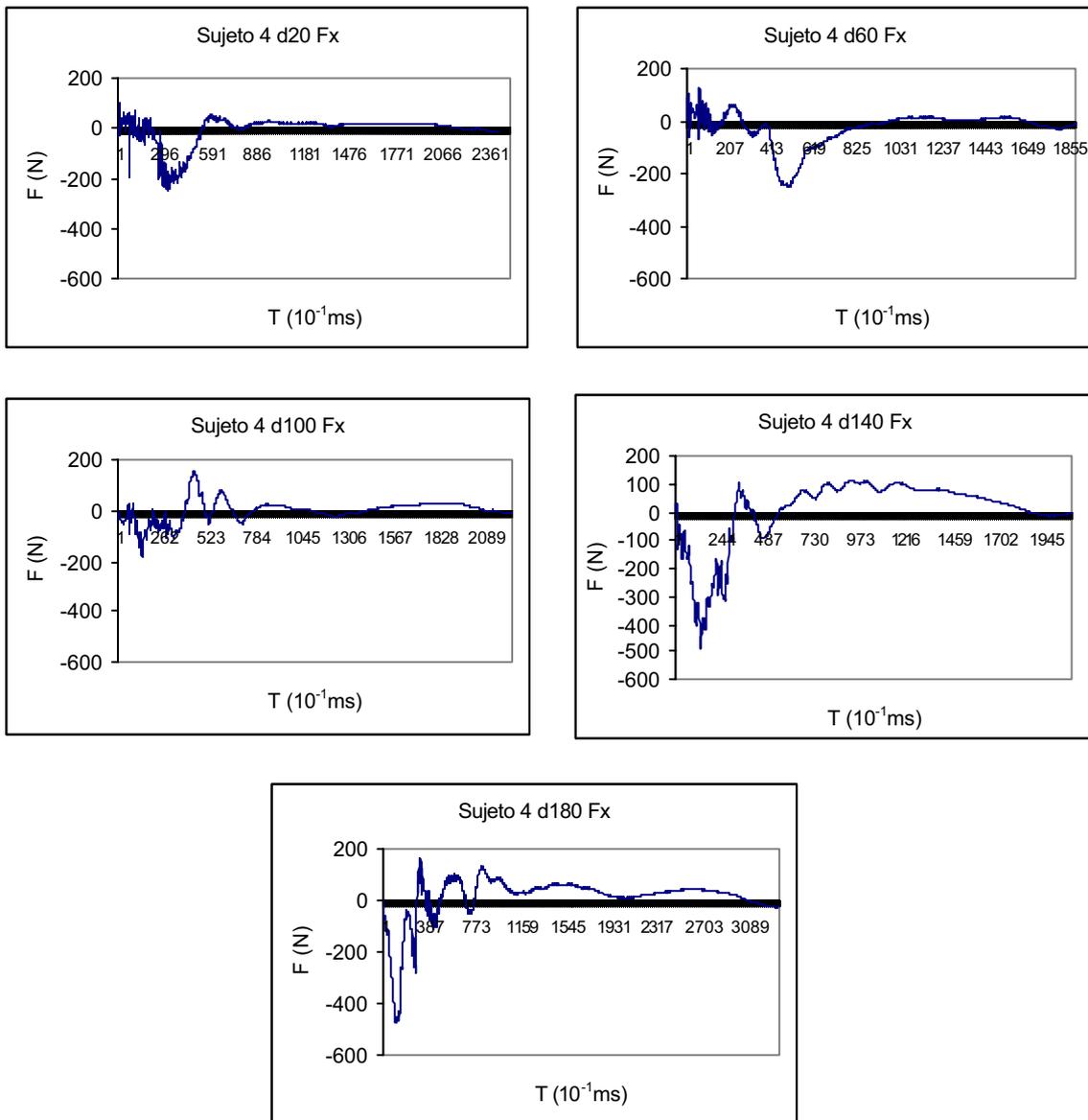


Fig. a16 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 4 en los saltos del estudio 2.A.

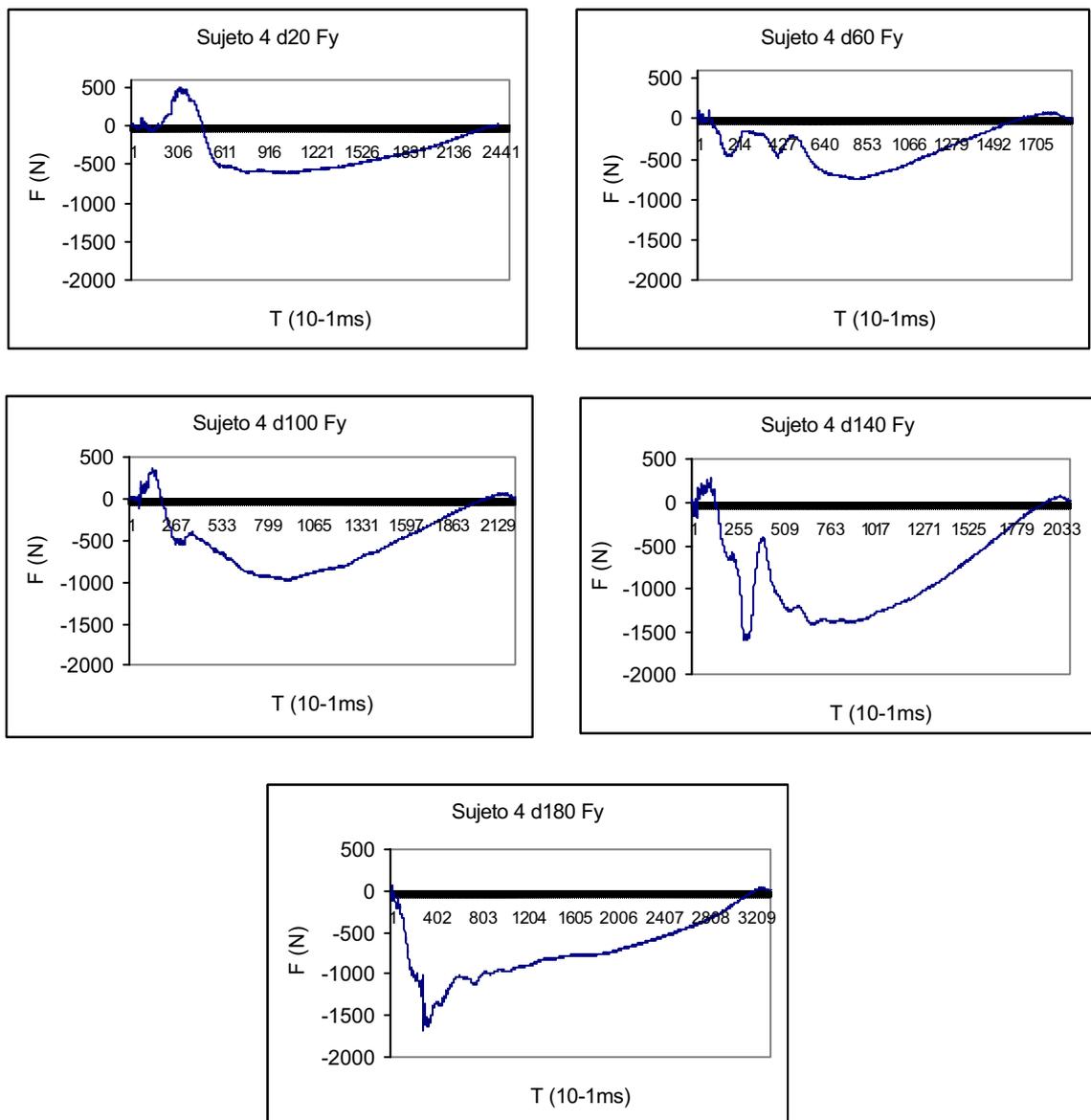


Fig. a17 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 4 en los saltos del estudio 2.A.

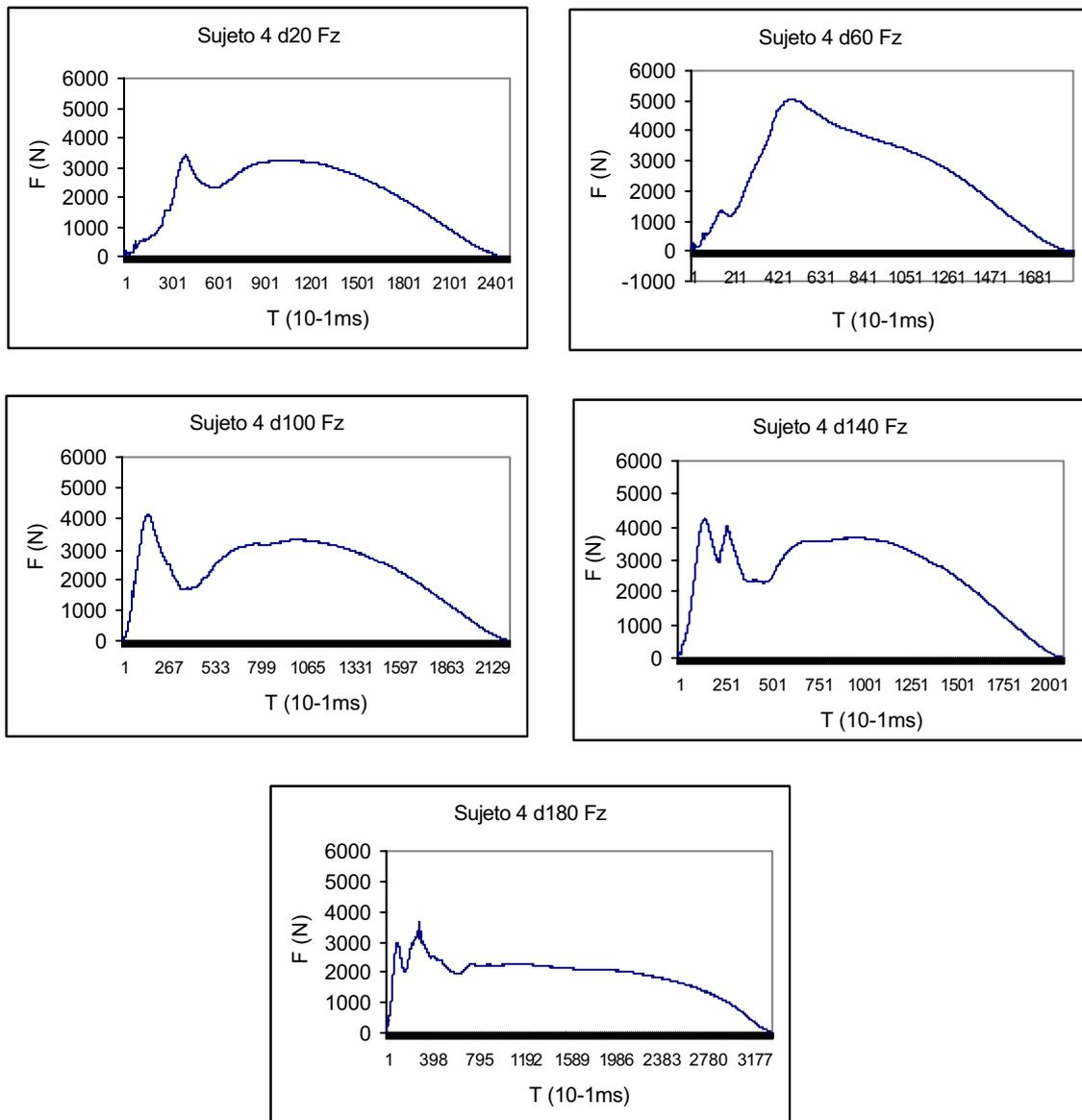


Fig.a18 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 4 en los saltos del estudio 2.A.

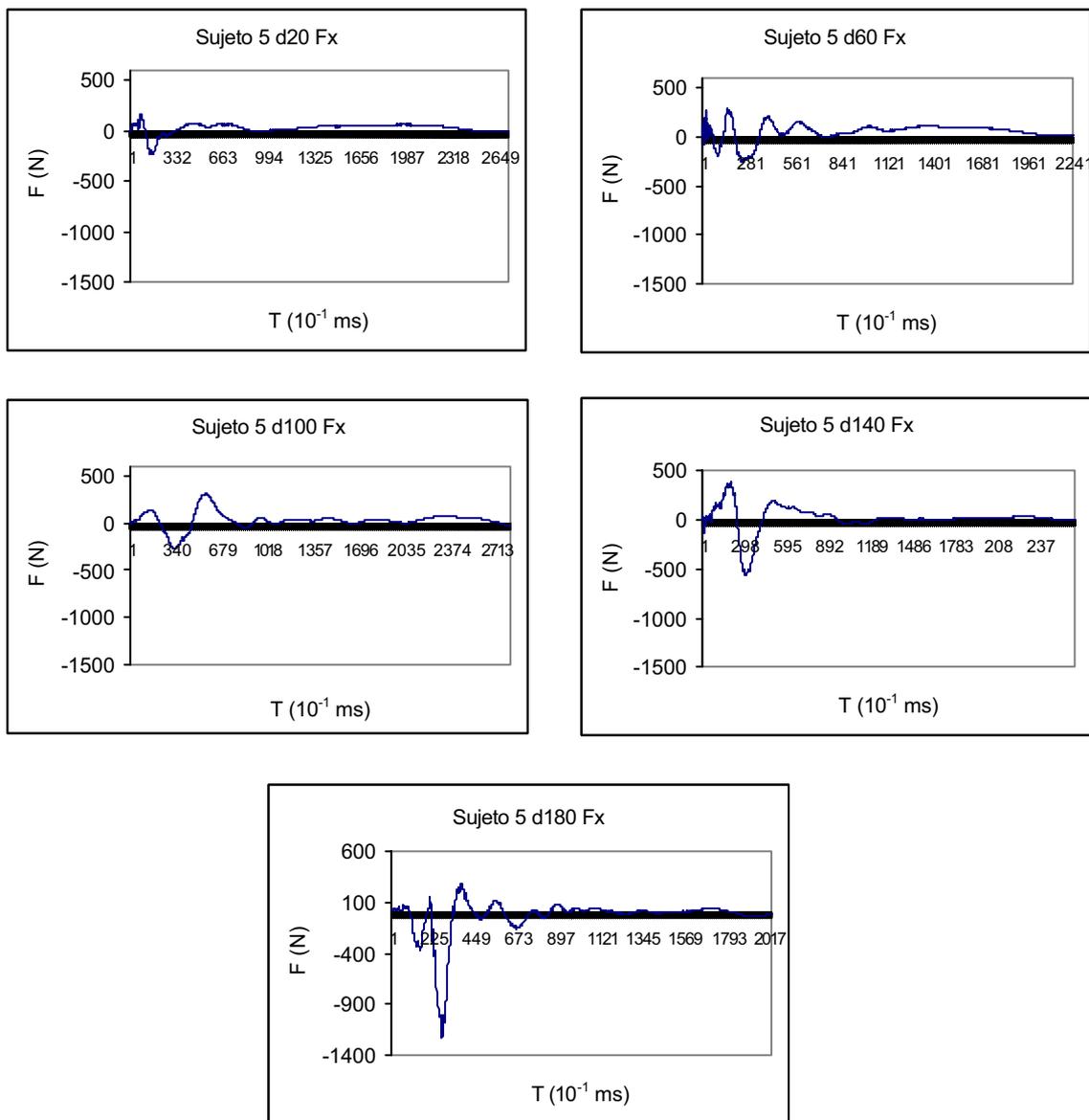


Fig. a19 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 5 en los saltos del estudio 2.A.

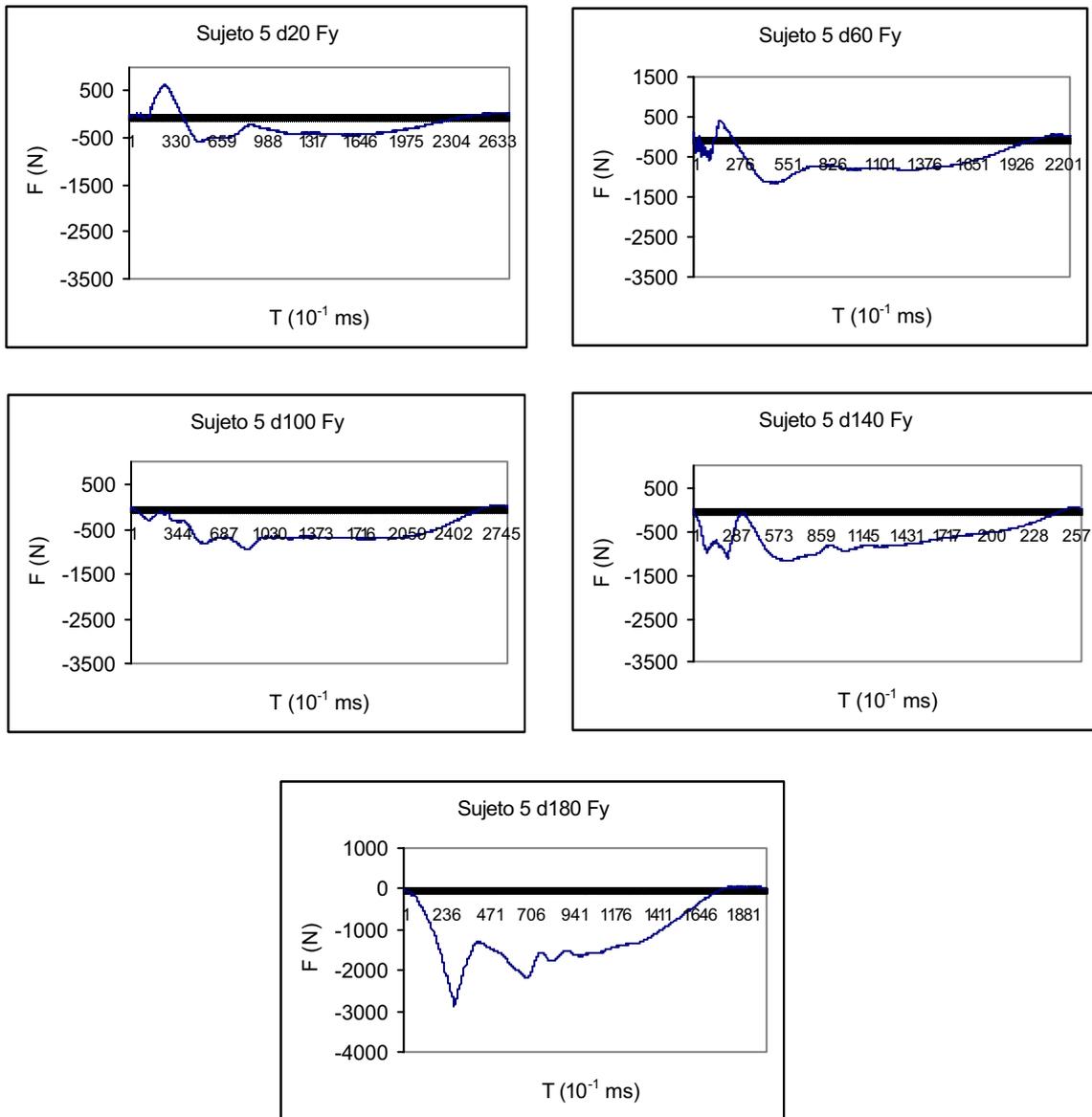


Fig. a20 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 5 en los saltos del estudio 2.A.

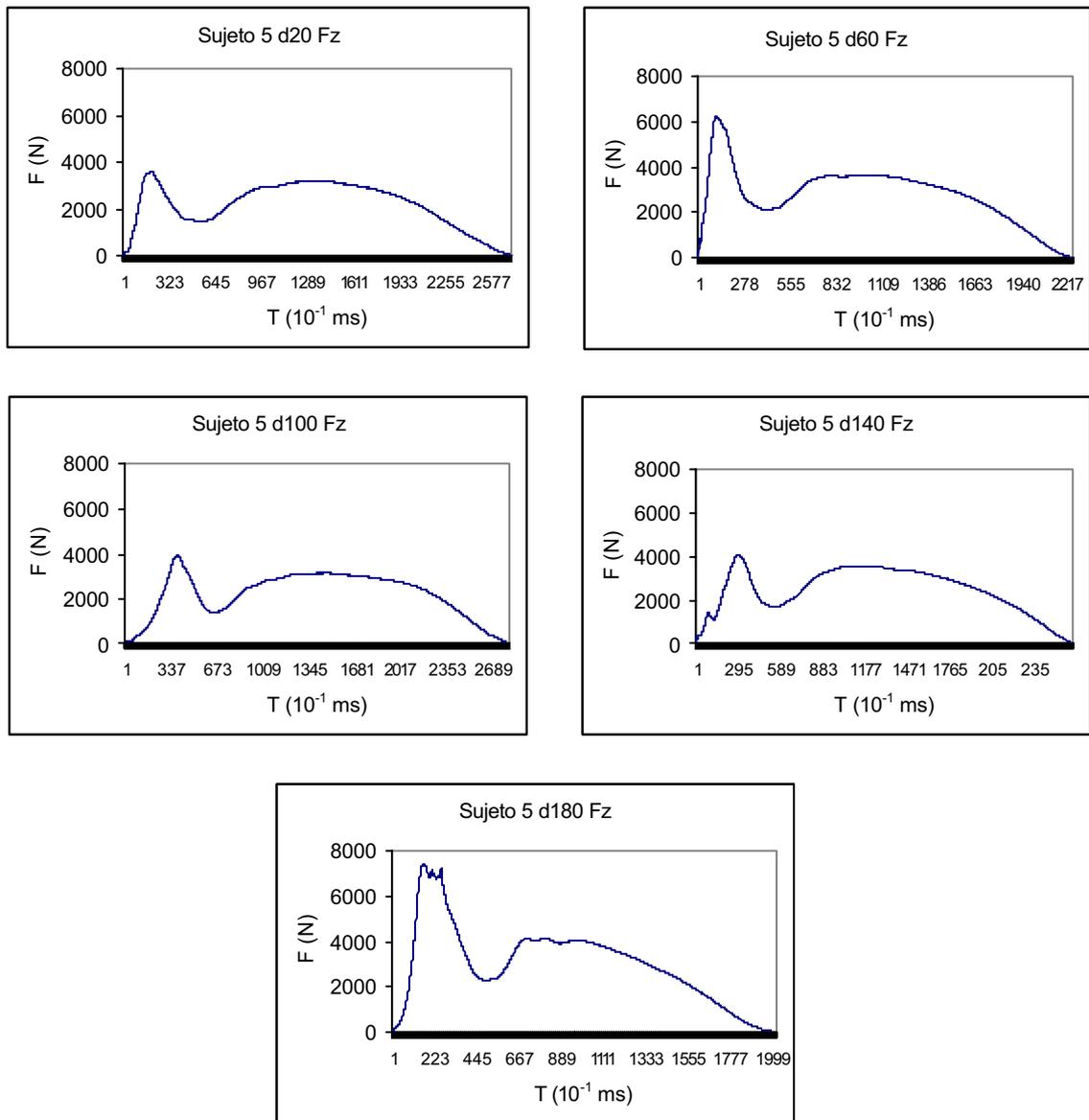


Fig. a21 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 5 en los saltos del estudio 2.A.

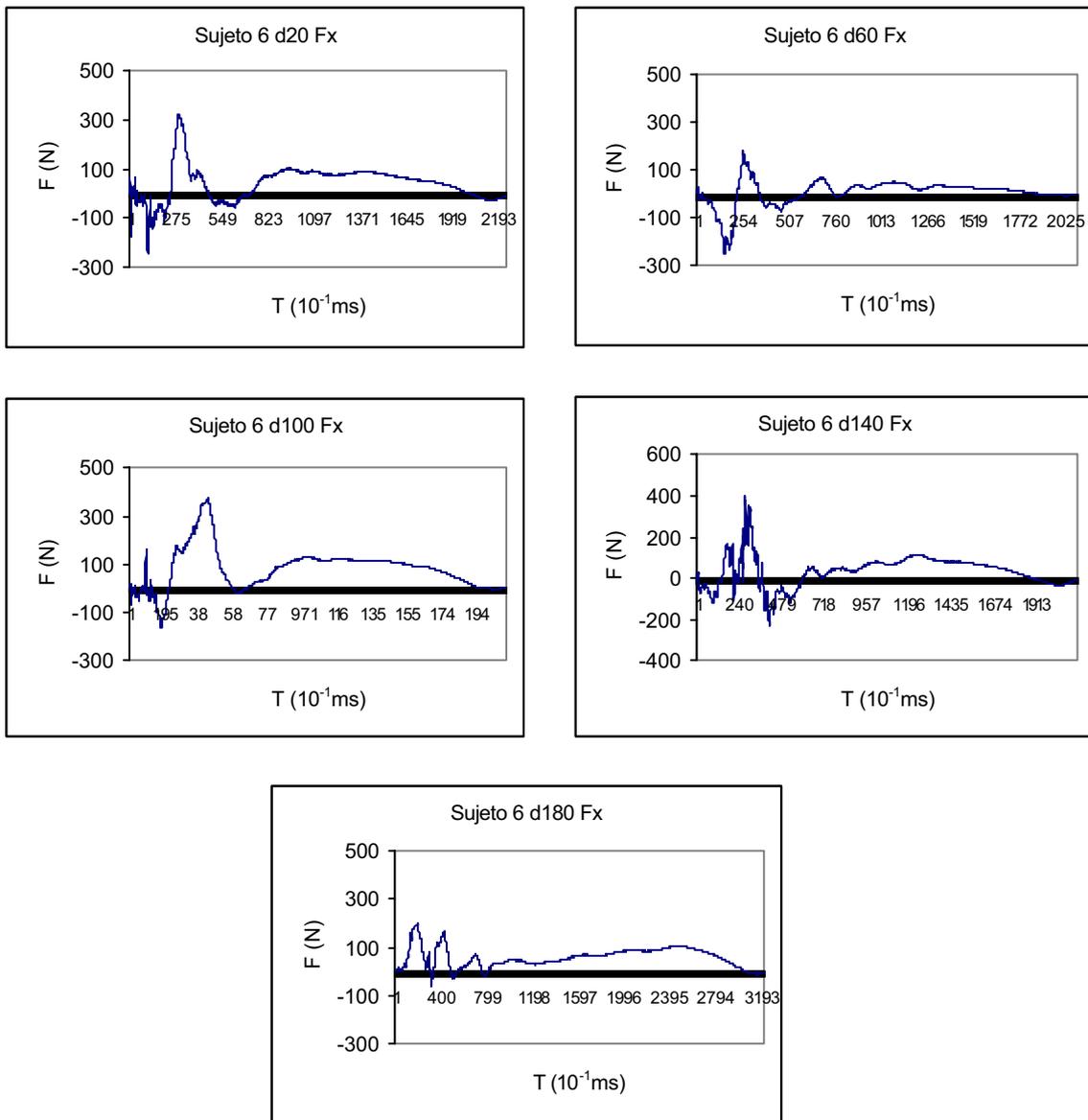


Fig. a22 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 6 en los saltos del estudio 2.A.

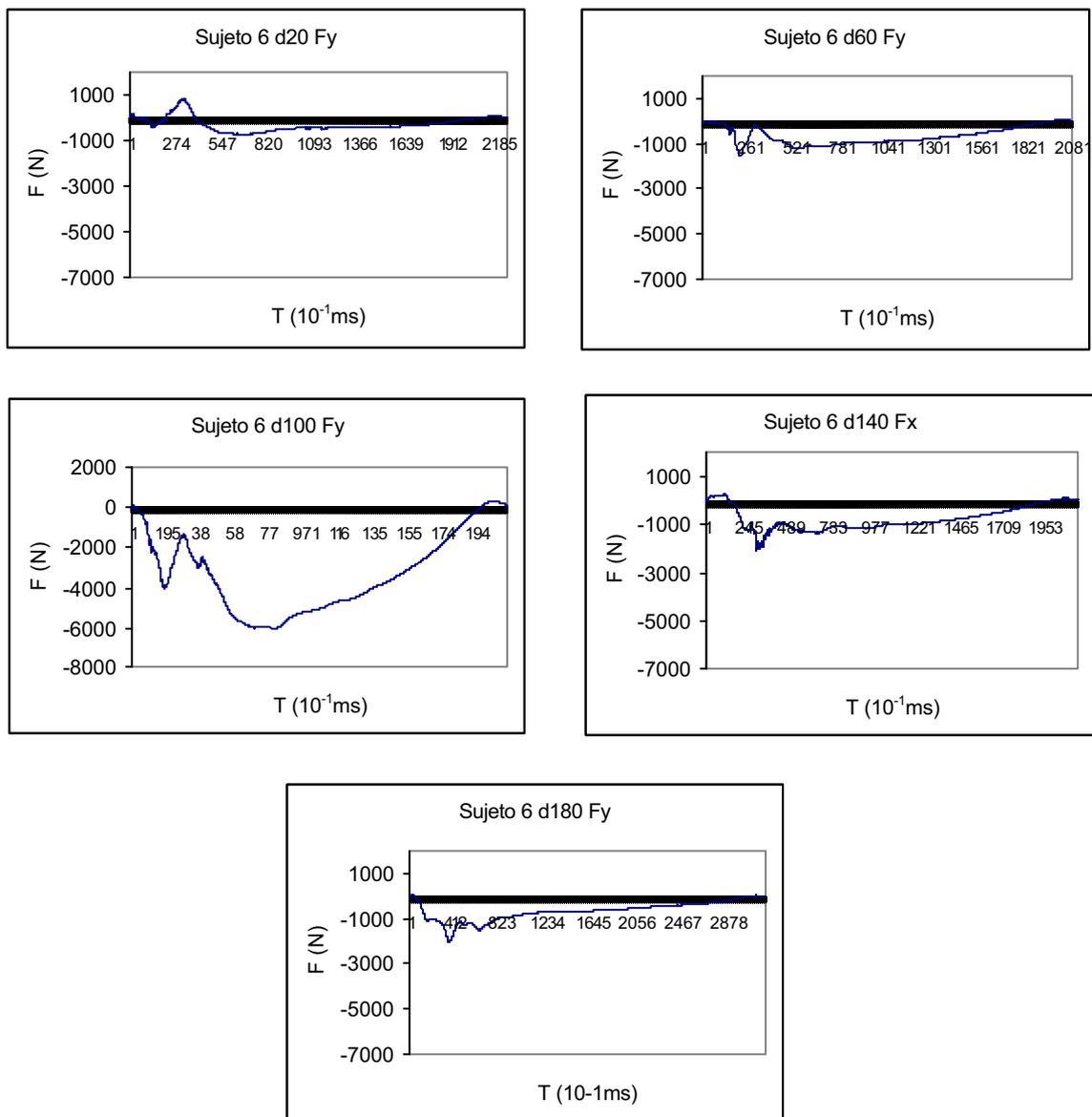


Fig. a23 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 6 en los saltos del estudio 2.A.

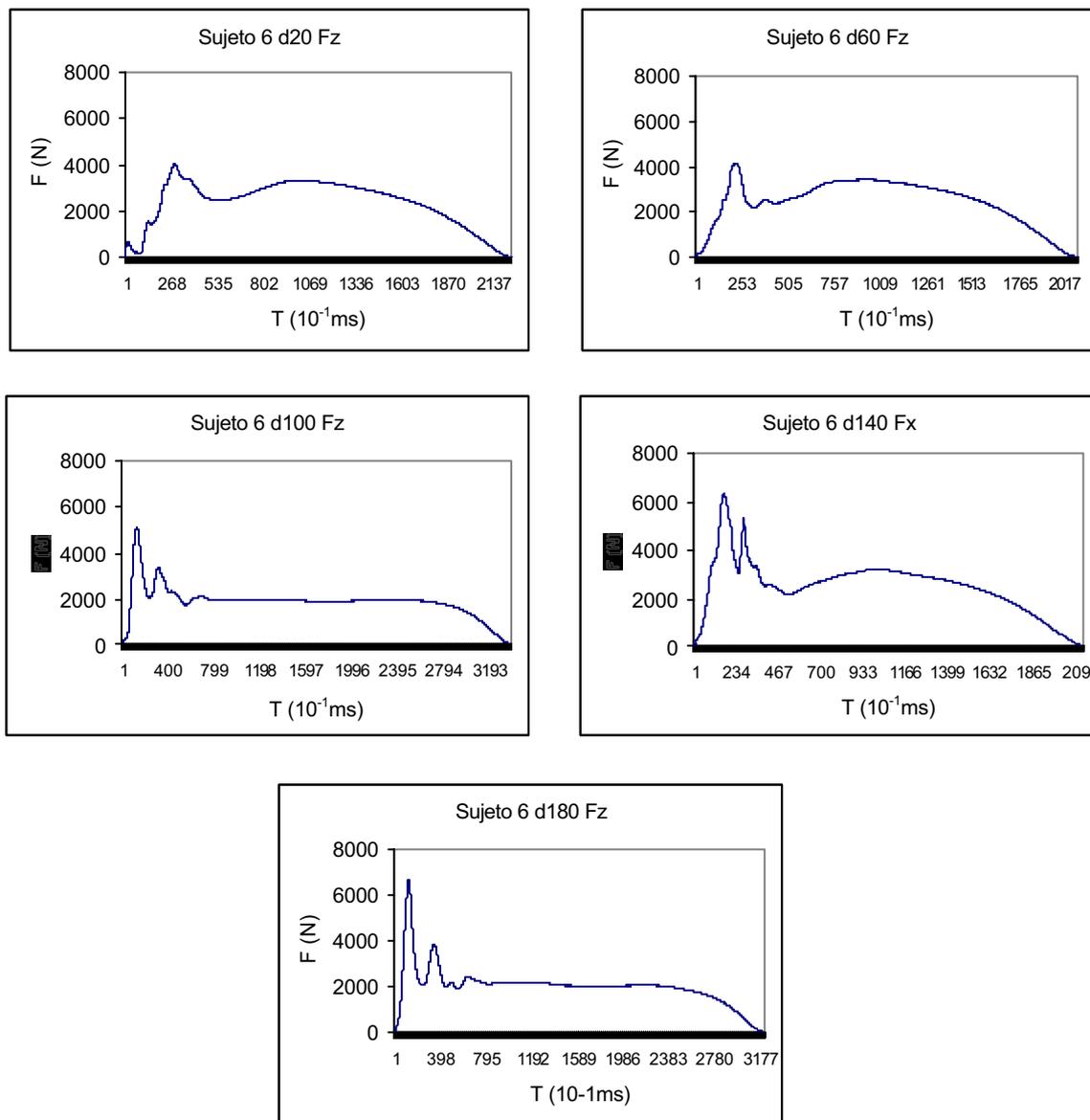


Fig. a24 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 6 en los saltos del estudio 2.A.

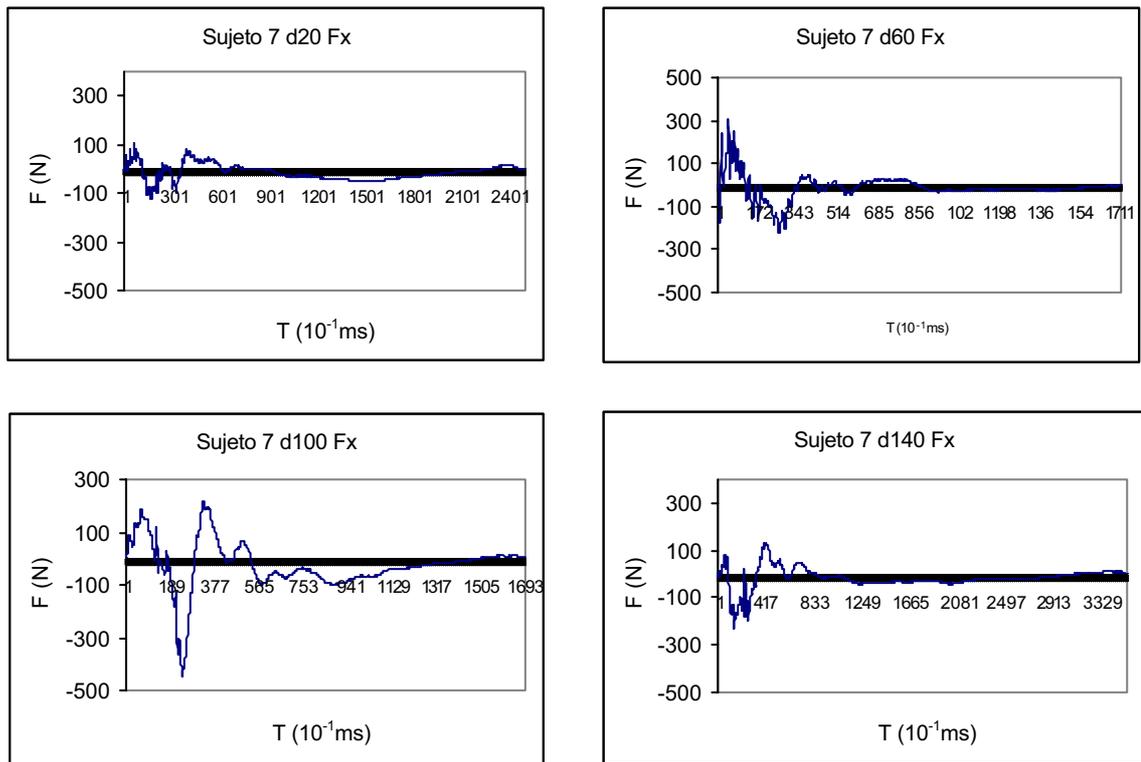


Fig. a25 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 7 en los saltos del estudio 2.A.

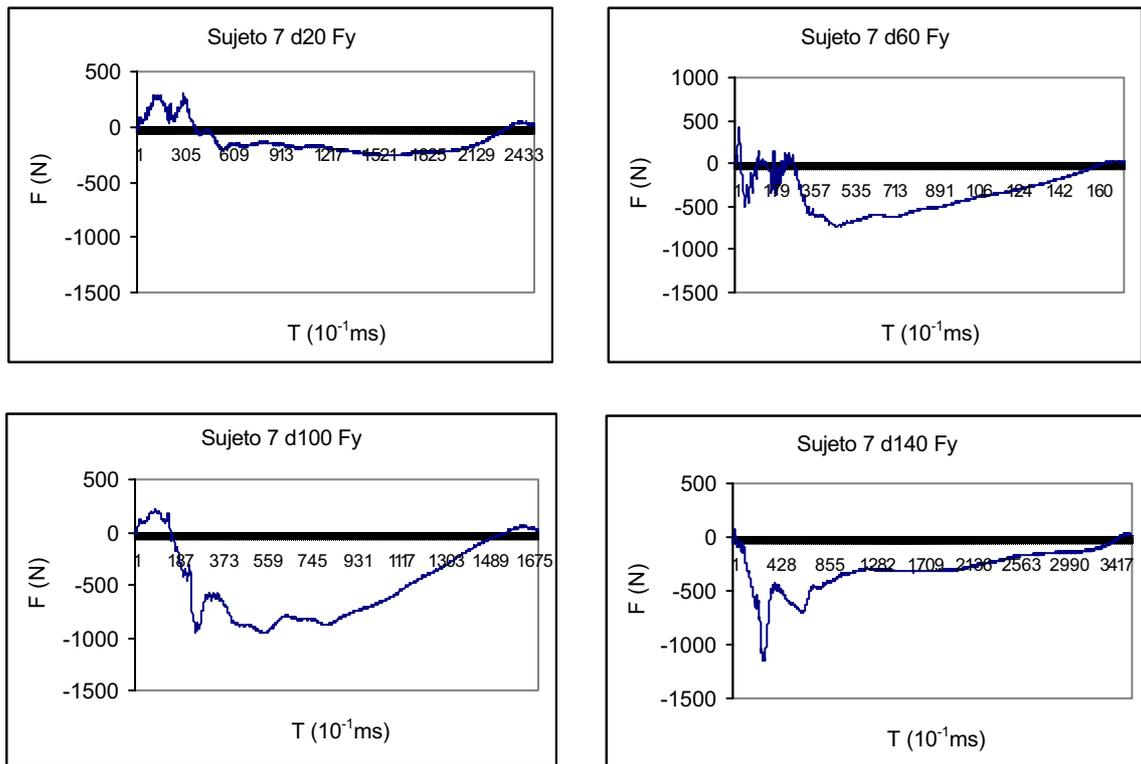


Fig. a26 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 7 en los saltos del estudio 2.A.

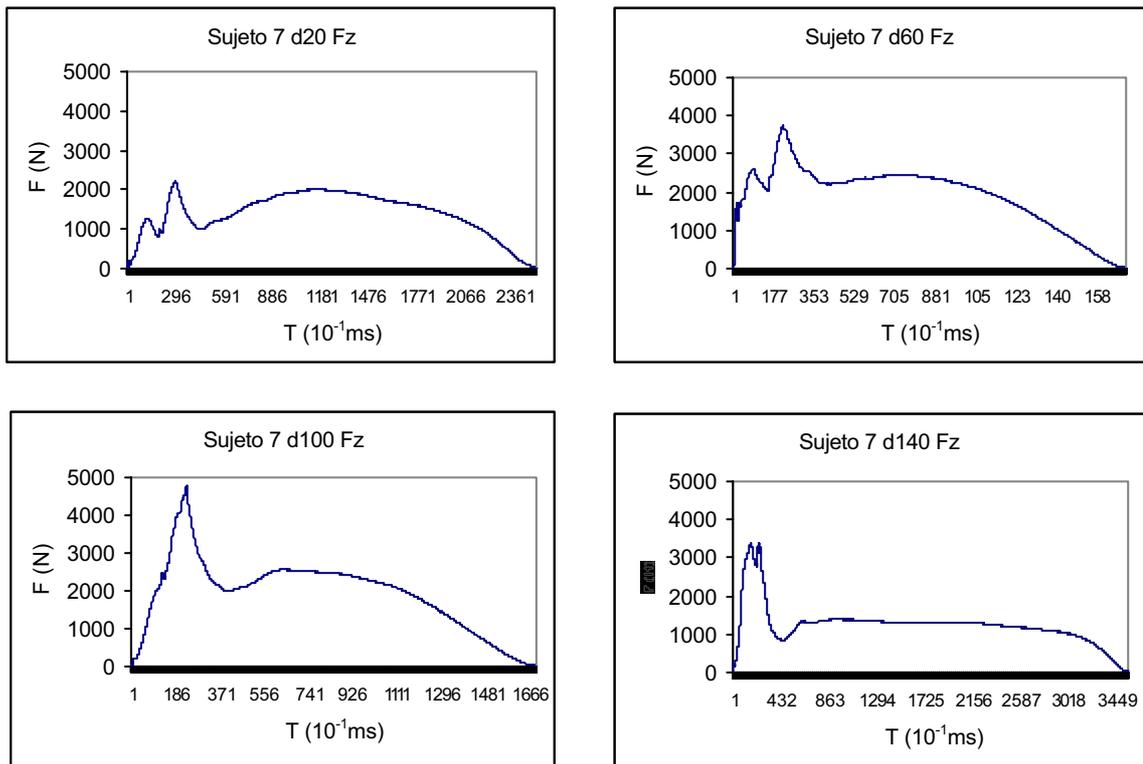


Fig. a27 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 7 en los saltos del estudio 2.A.

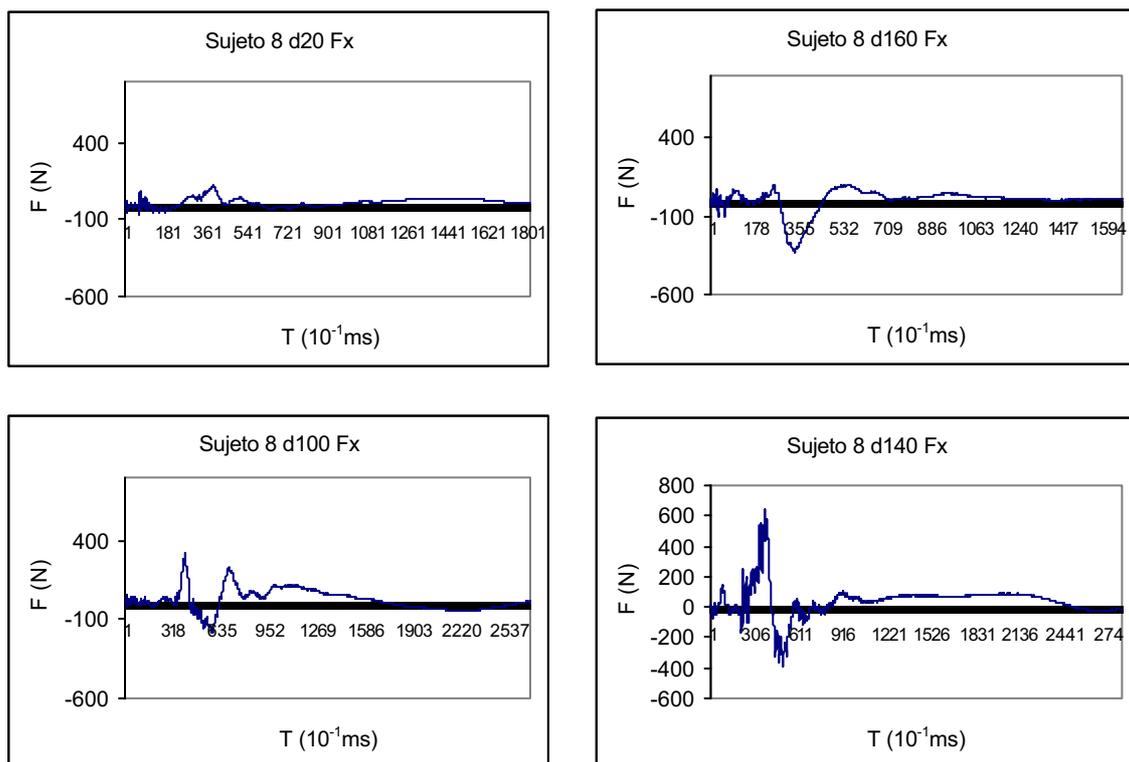


Fig. a28 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 8 en los saltos del estudio 2.A.

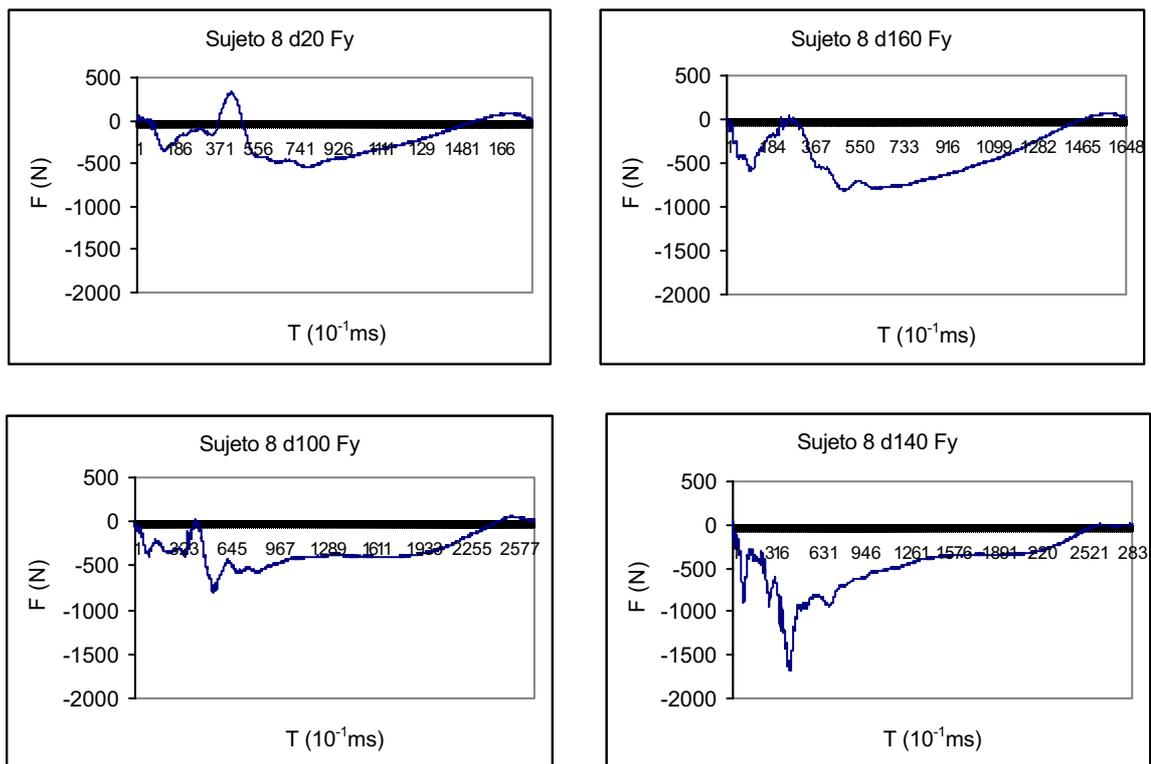


Fig. a29 Series temporales del componente anteroposteriorl de la fuerza (Fy) del sujeto 8 en los saltos del estudio 2.A.

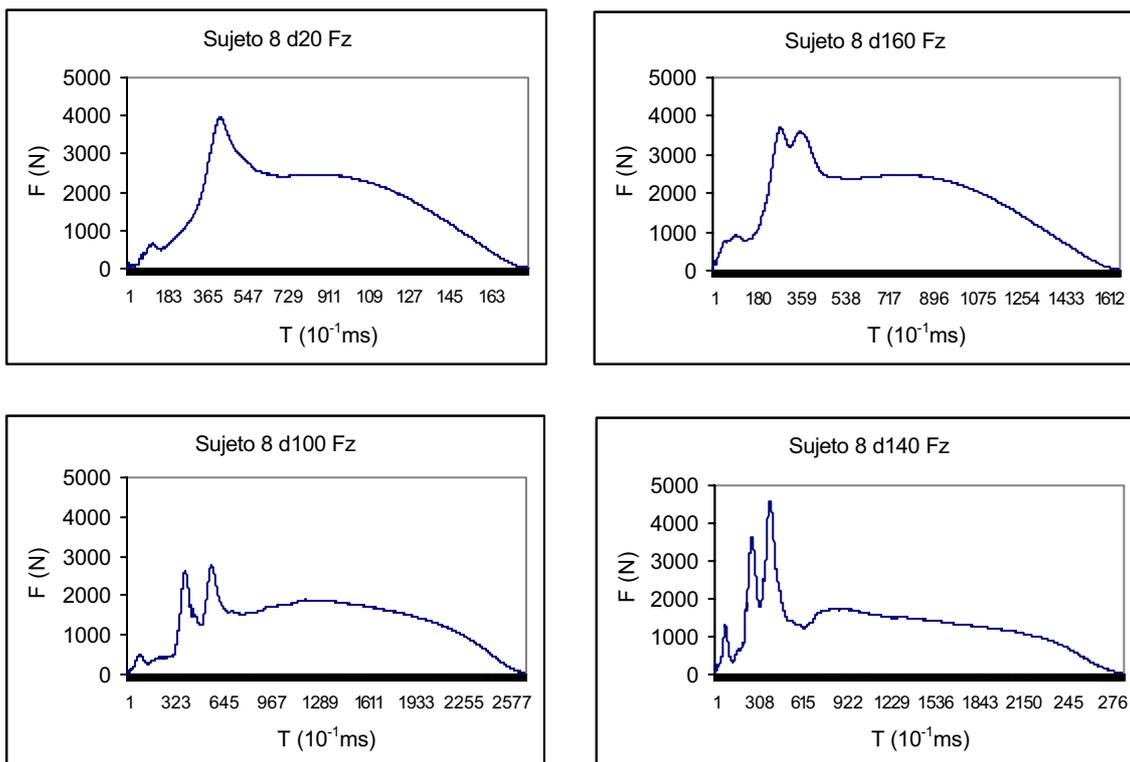


Fig. a30 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 8 en los saltos del estudio 2.A.

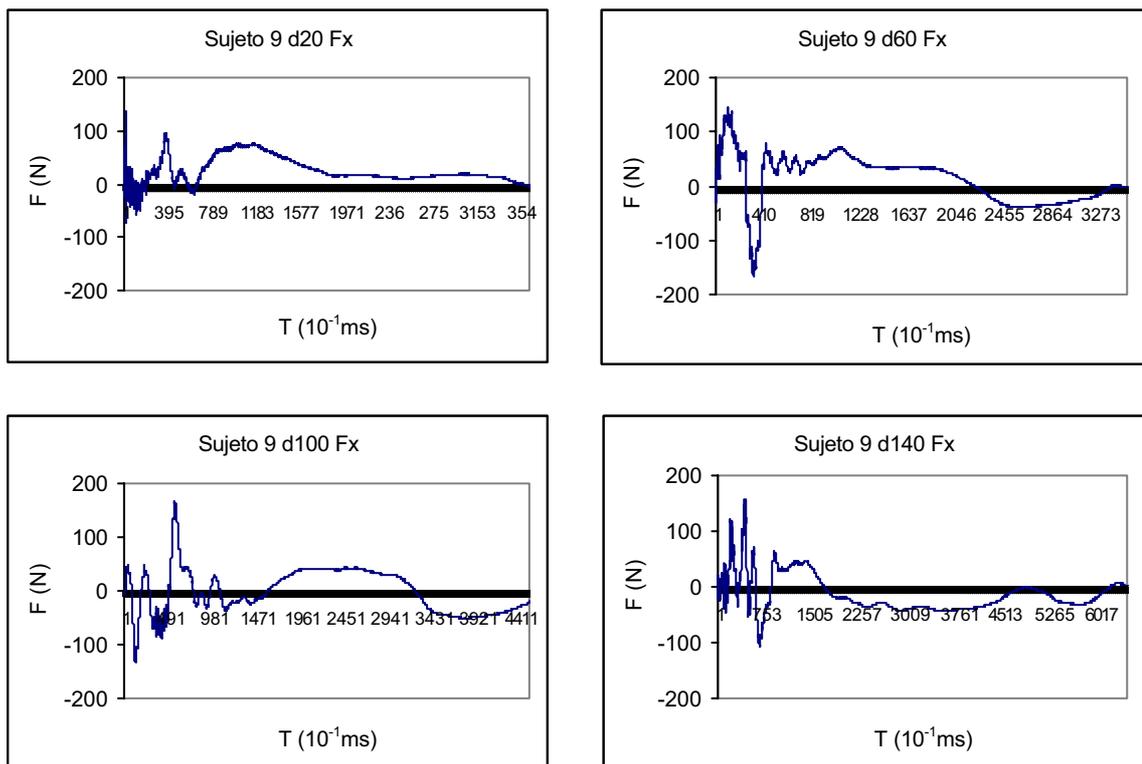


Fig. a31 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (F_x) del sujeto 9 en los saltos del estudio 2.A.

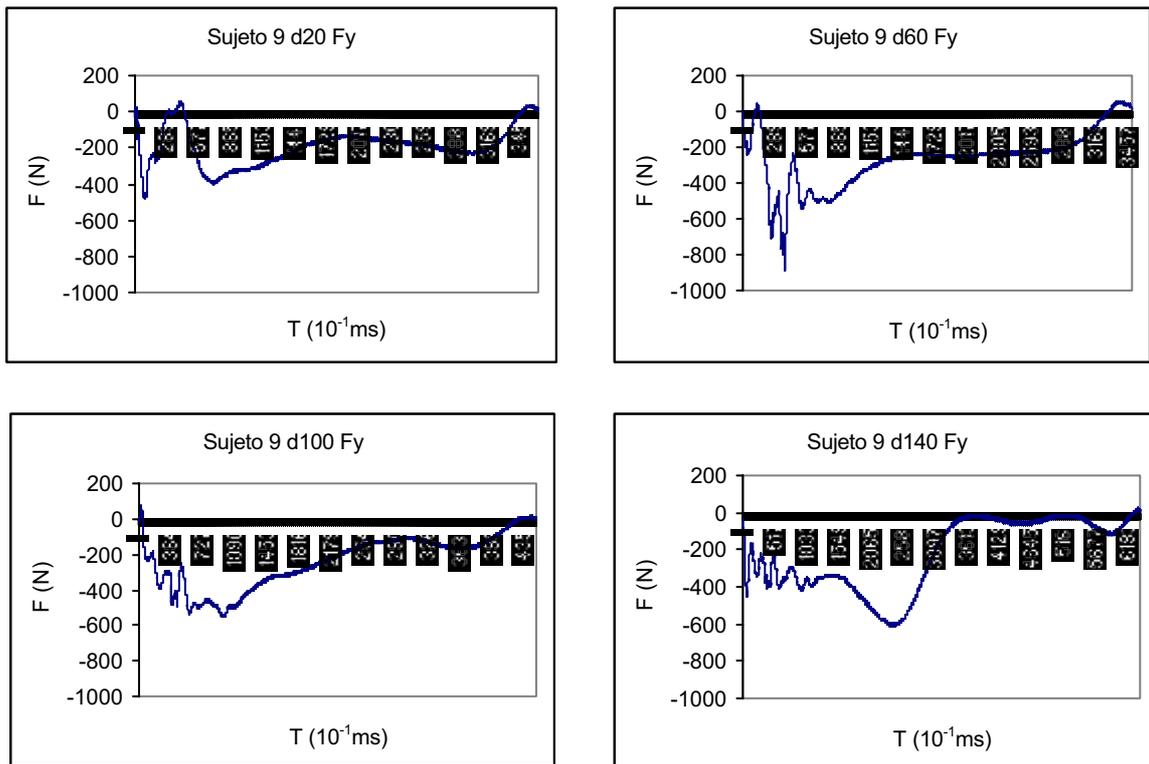


Fig. a32 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 9 en los saltos del estudio 2.A.

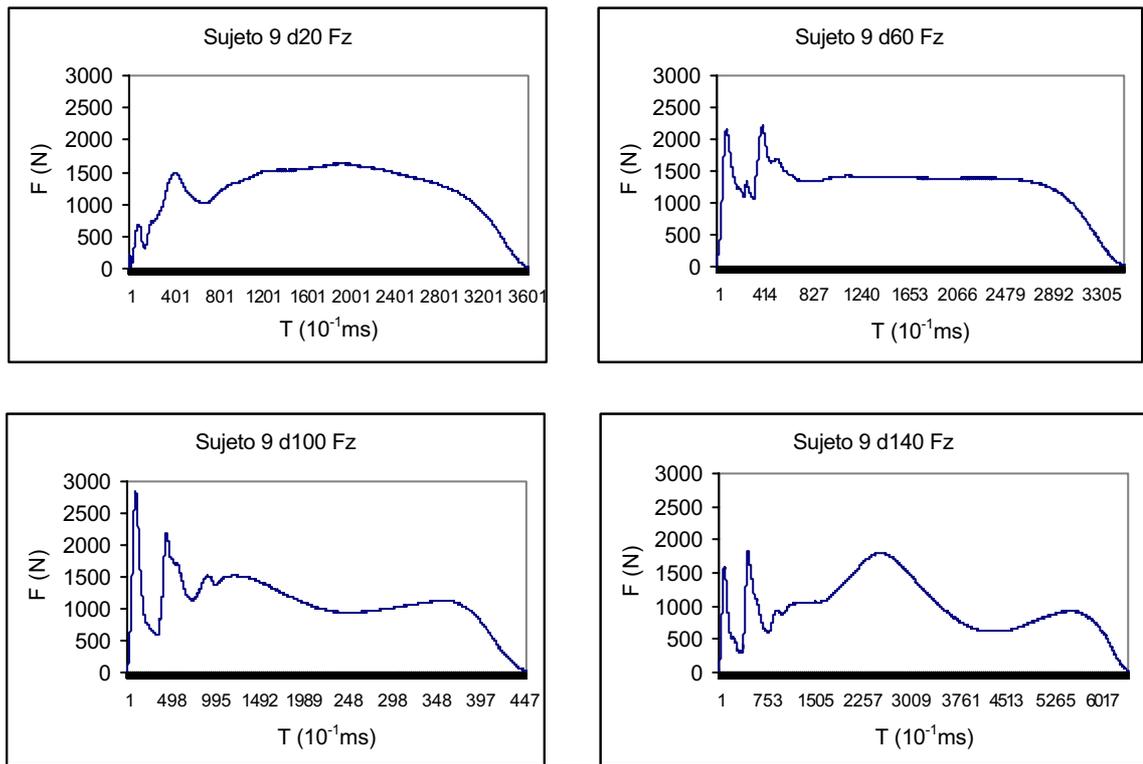


Fig. a33 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 9 en los saltos del estudio 2.A.

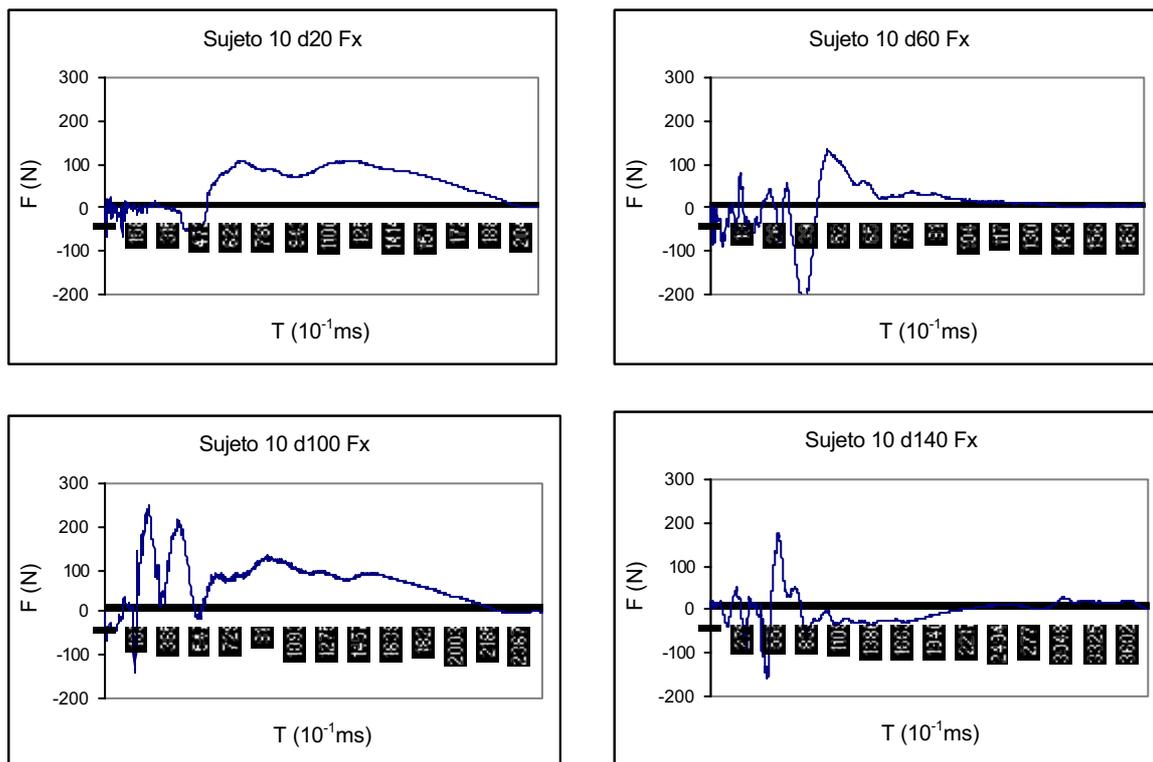


Fig. a34 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 10 en los saltos del estudio 2.A.

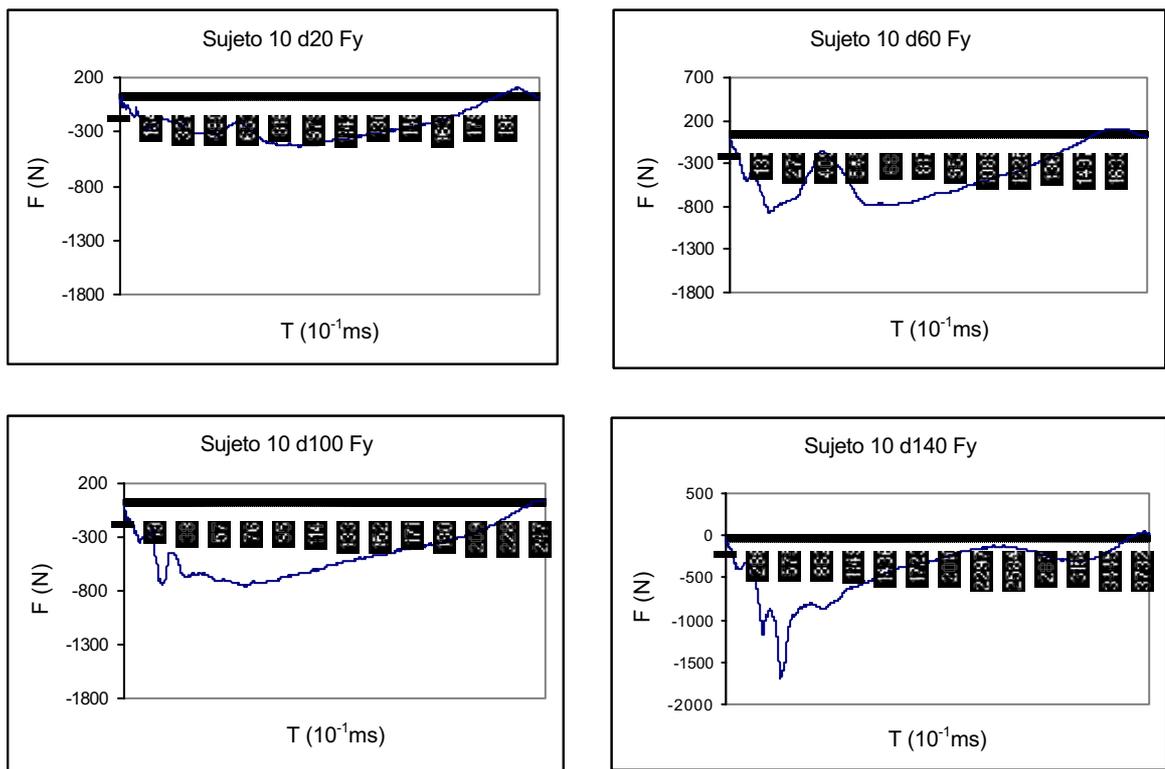


Fig. a35 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 10 en los saltos del estudio 2.A.

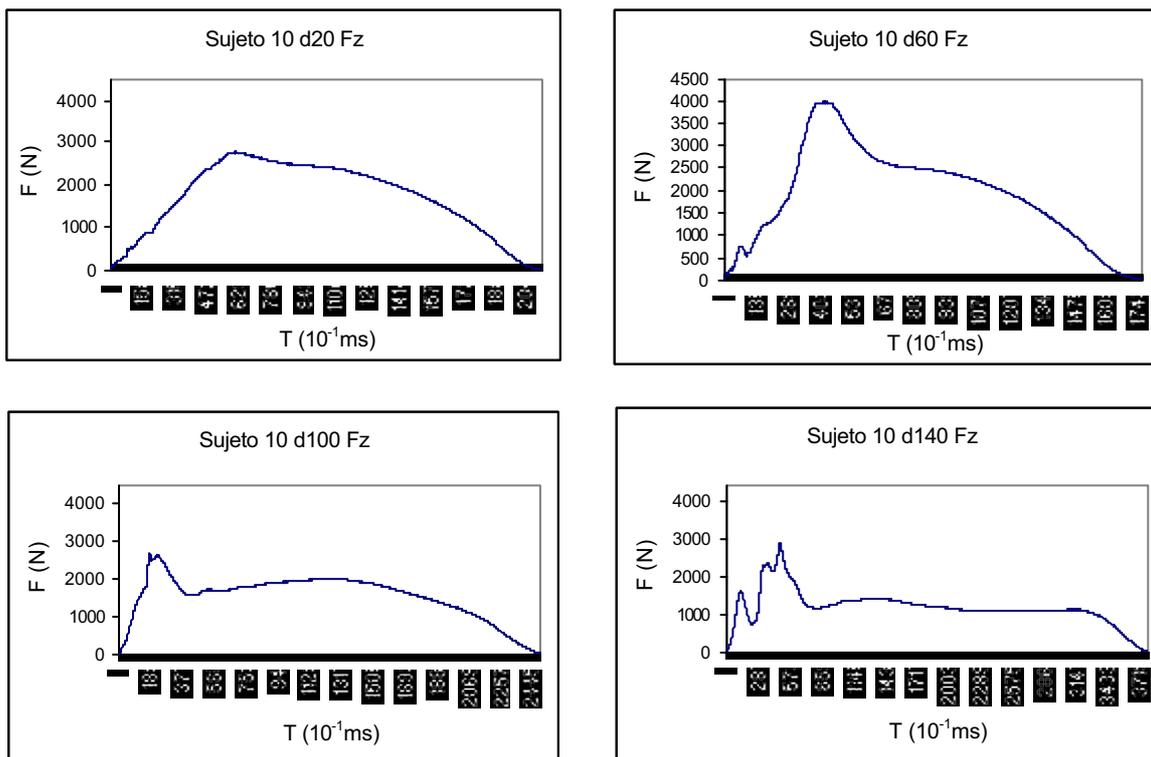


Fig. a36 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 10 en los saltos del estudio 2.A.

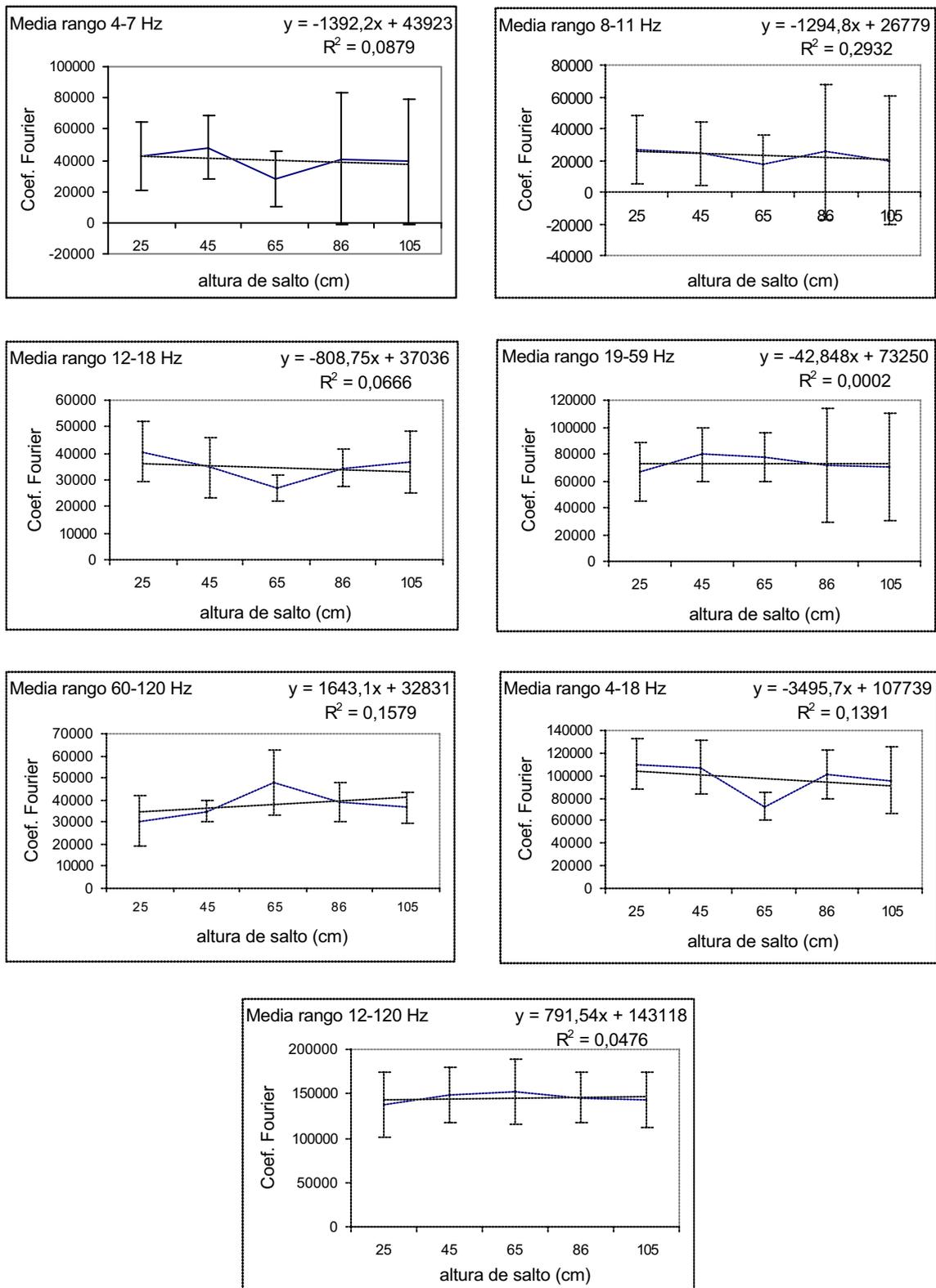


Fig. a37 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente mediolateral de la fuerza (F_x) de las series temporales completas del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

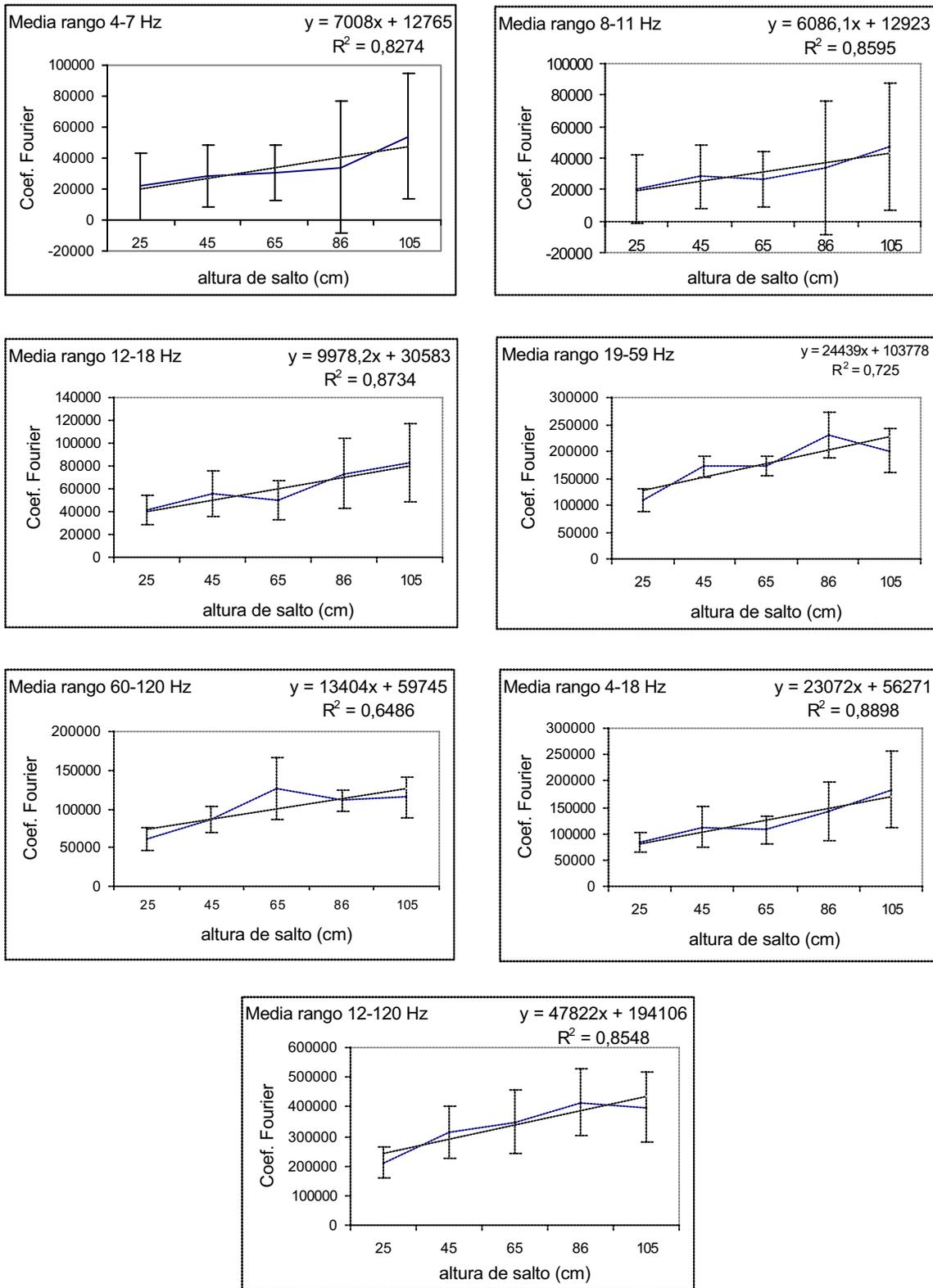


Fig. a38 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente mediolateral de la fuerza (F_x) del primer tercio de las series temporales del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

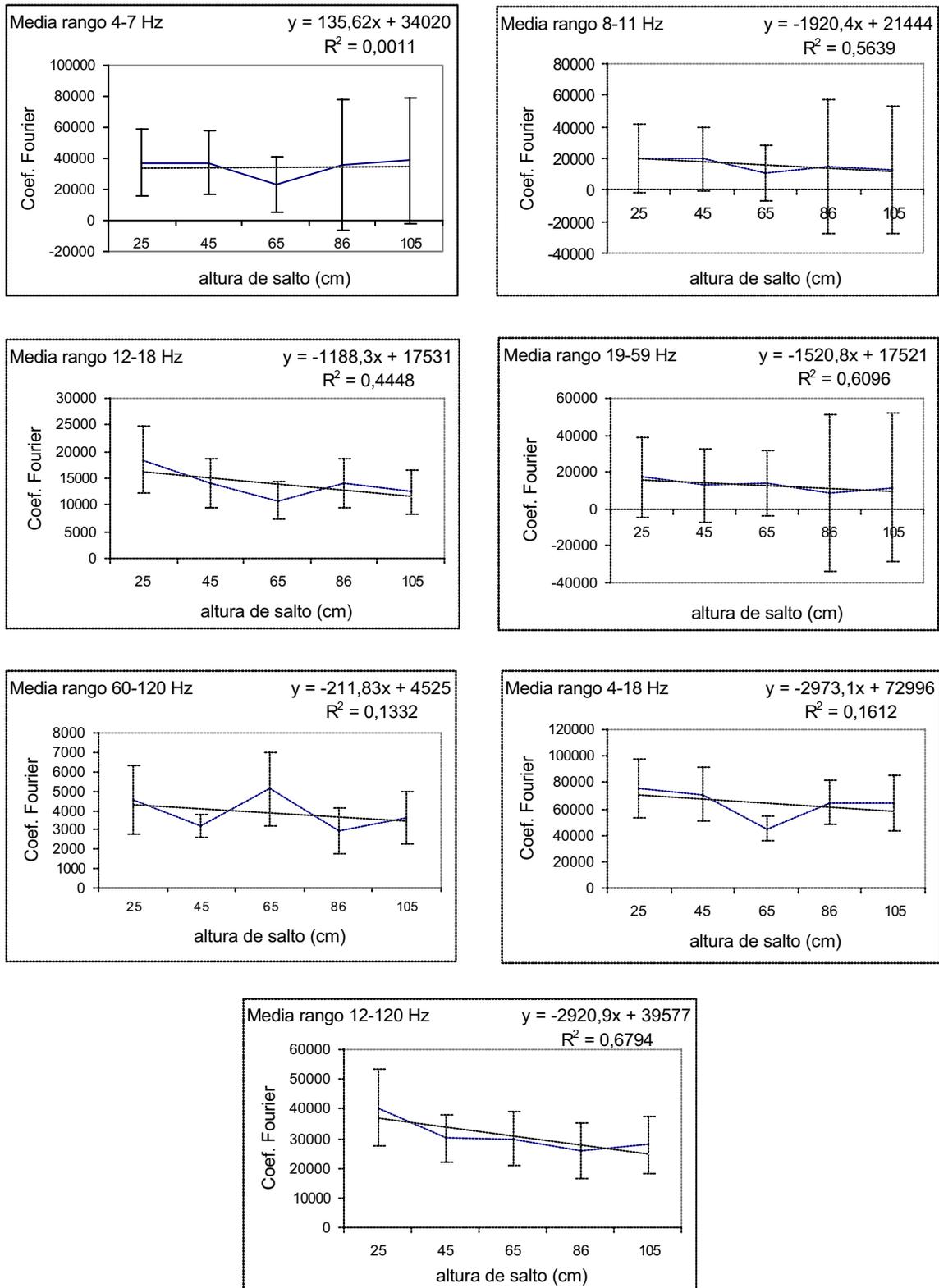


Fig. a39 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente mediolateral de la fuerza (Fx) de los dos últimos tercios de las series temporales del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

*p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

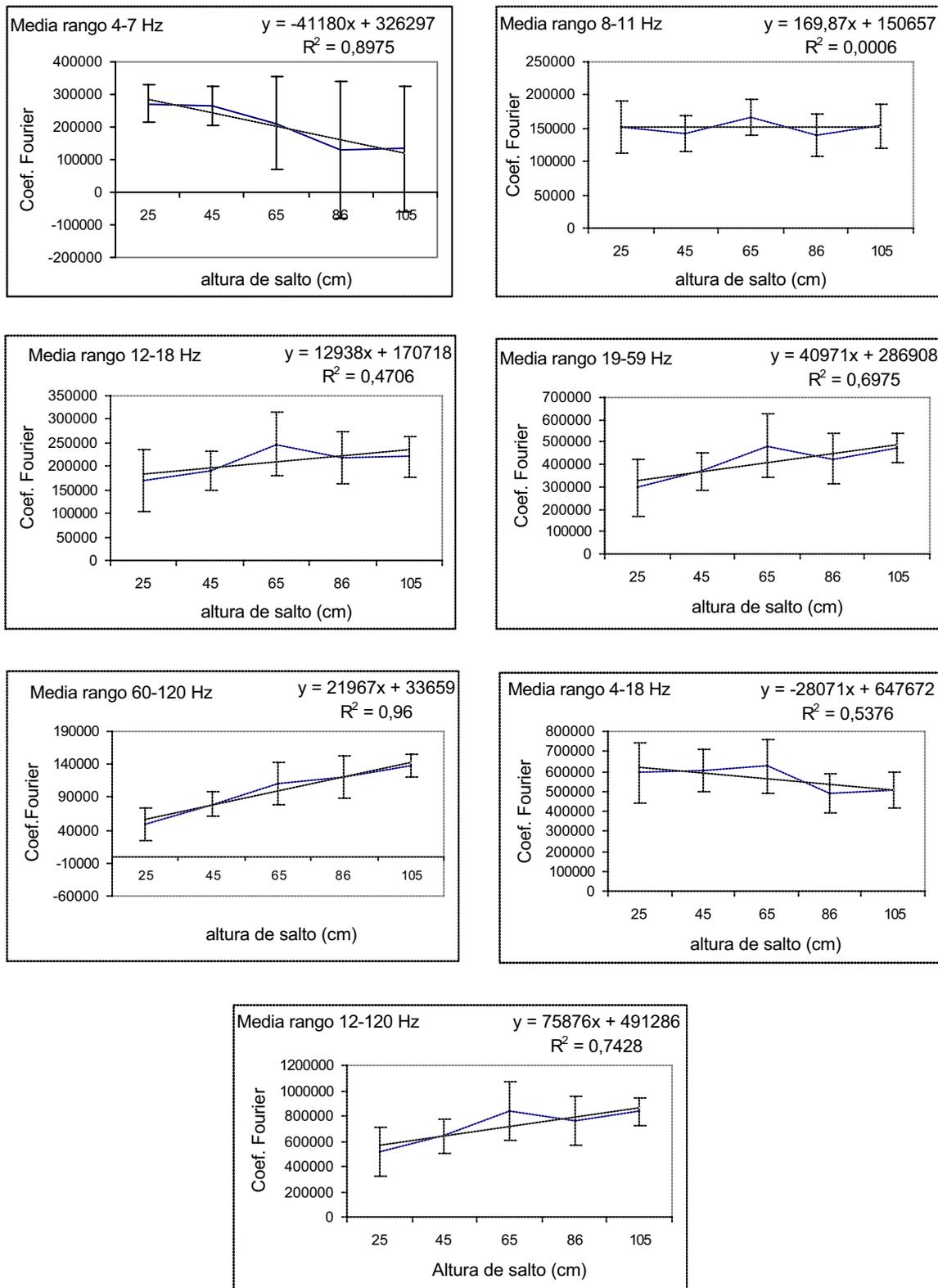


Fig. a40 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente anteroposterior de la fuerza (Fy) de las series temporales completas del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

*p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

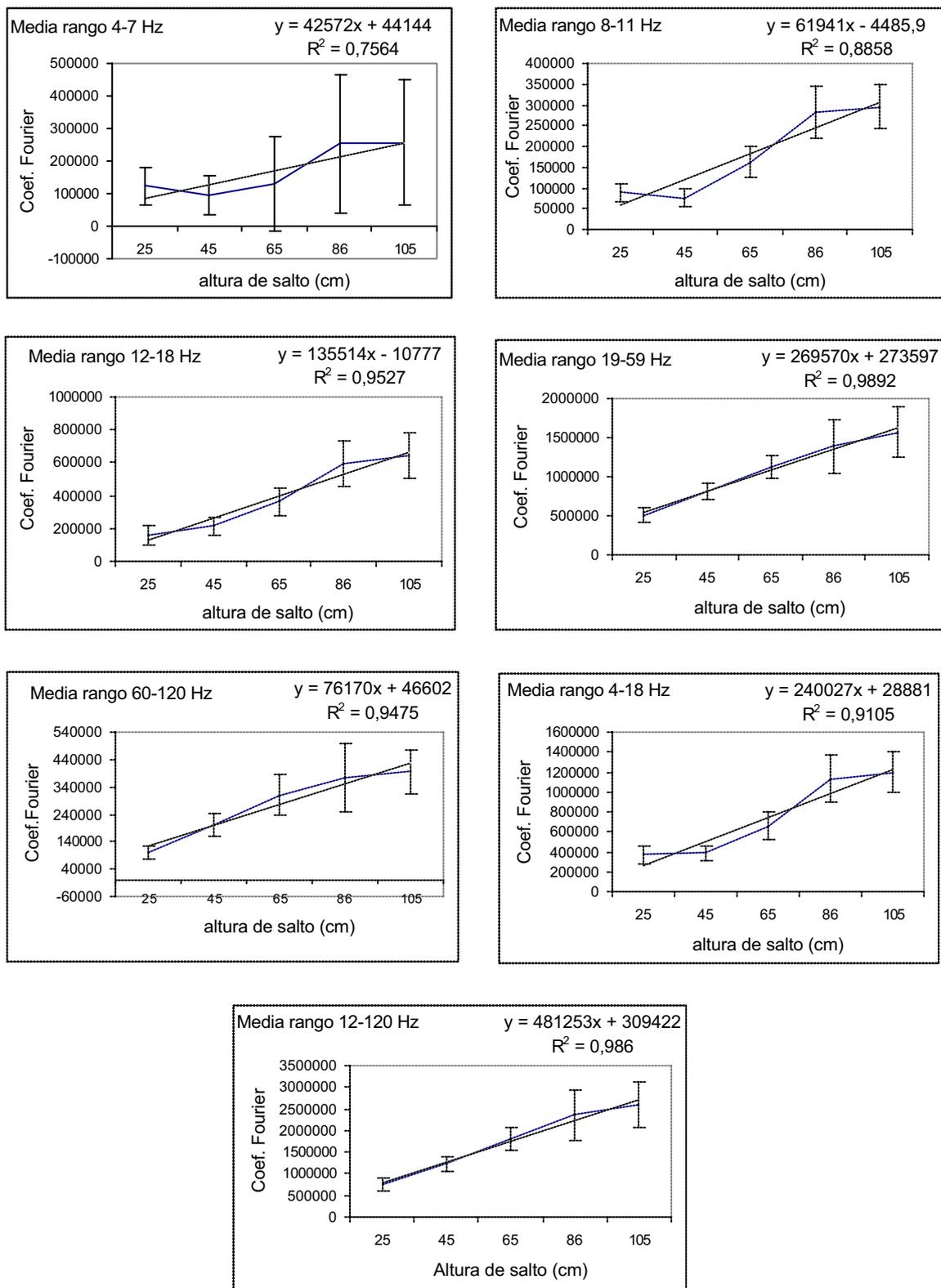


Fig. a41 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del primer tercio de las series temporales del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

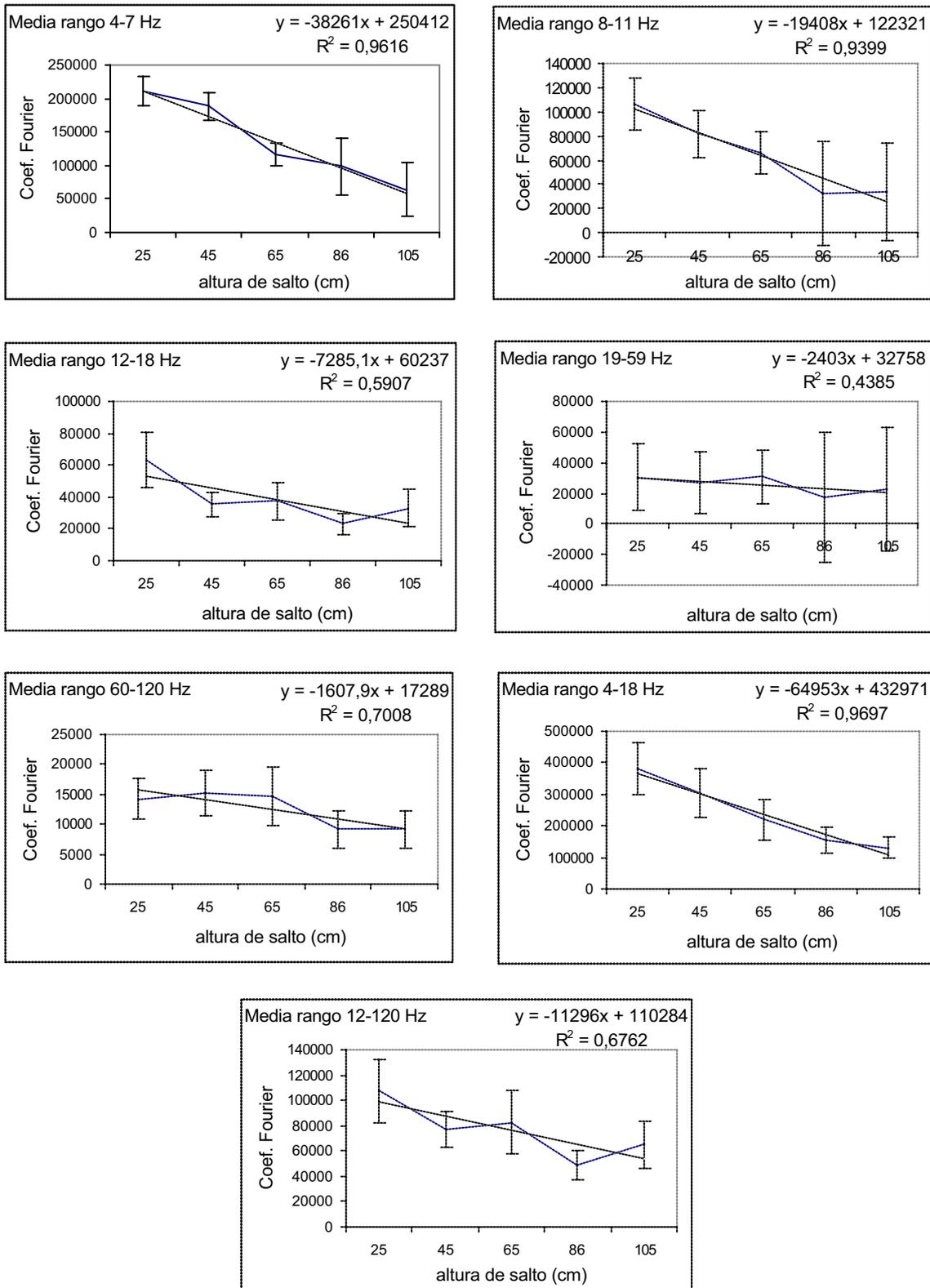


Fig. a42 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente anteroposterior de la fuerza (Fy) de los dos últimos tercios de las series temporales del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

*p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

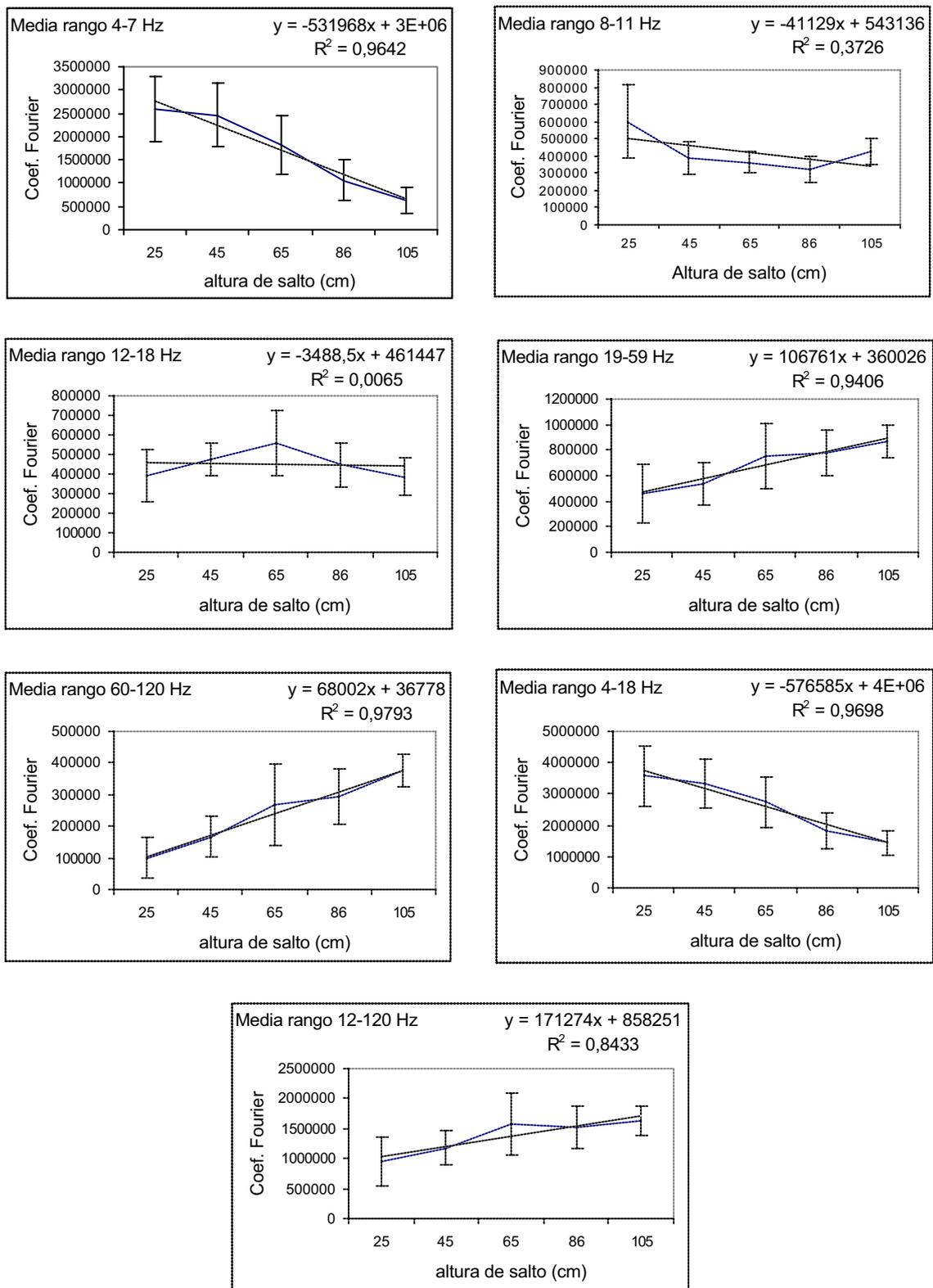


Fig. a43 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente vertical de la fuerza (F_z) de las series temporales completas del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R^2 .

* $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,05$

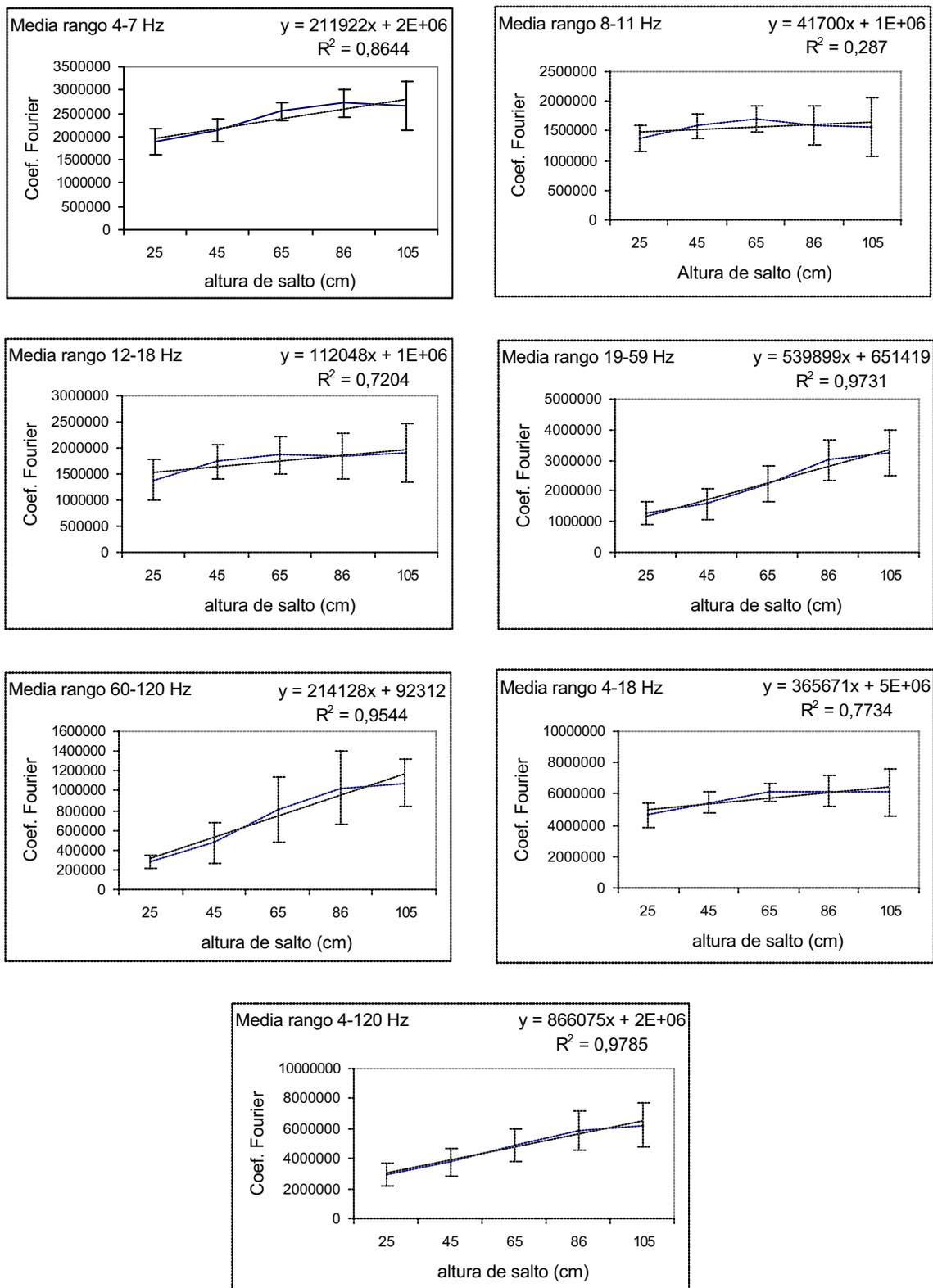


Fig. a44 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente vertical de la fuerza (Fz) del primer tercio de las series temporales del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

*p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

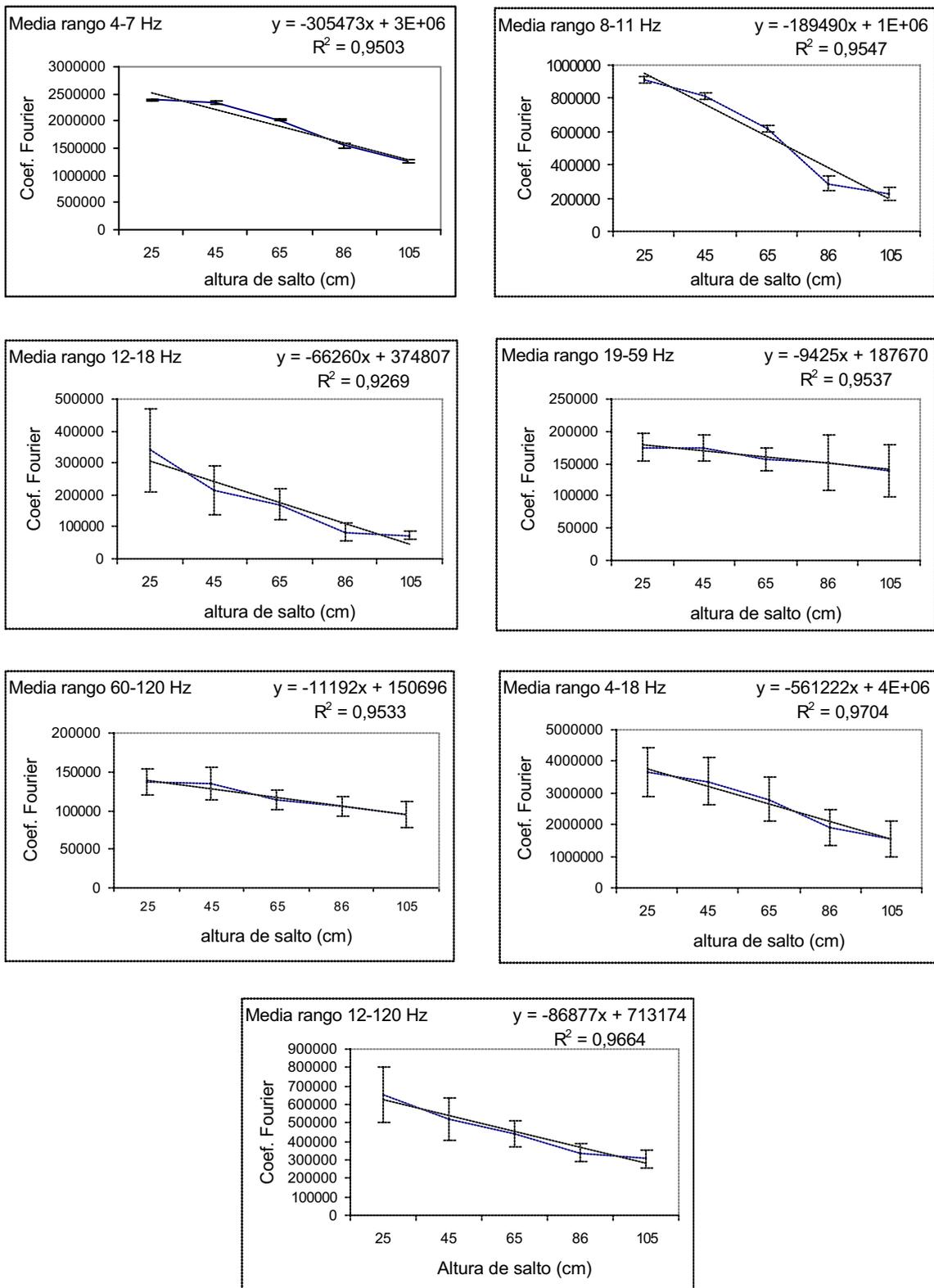


Fig. a45 Media de los 10 sujetos y desviación estándar de los valores de Fourier obtenidos en cada franja en el componente vertical de la fuerza (Fz) de los dos últimos tercios de las series temporales del estudio 2.B en función de la altura de salto. La línea de puntos muestra la línea de tendencia, cuya ecuación puede verse en la parte superior derecha de cada gráfico con su coeficiente de determinación R².

*p<0,001; ** p<0,01; *** p<0,05

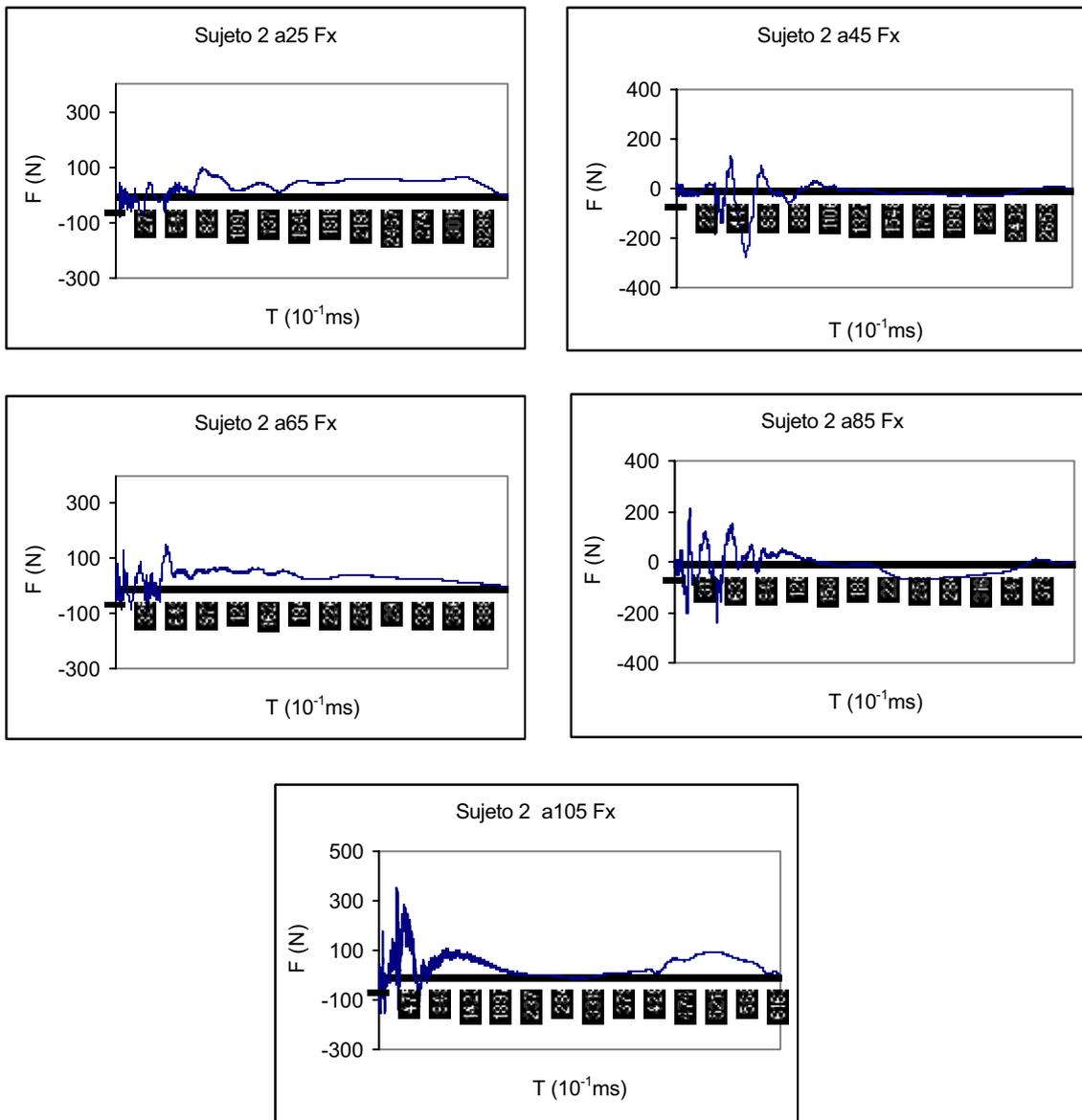


Fig. a46 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 2 en los saltos del estudio 2.B.

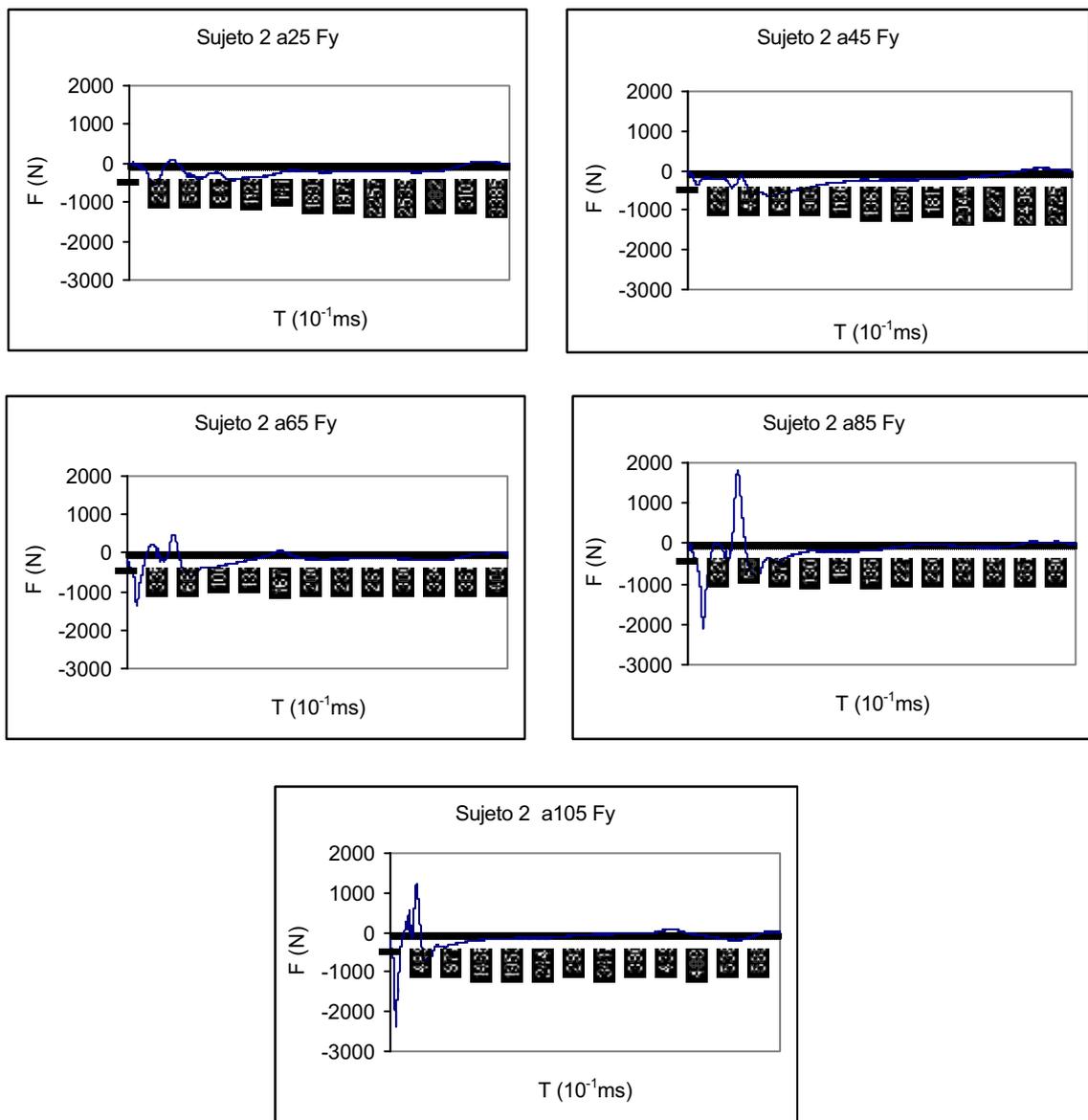


Fig. a47 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 2 en los saltos del estudio 2.B.

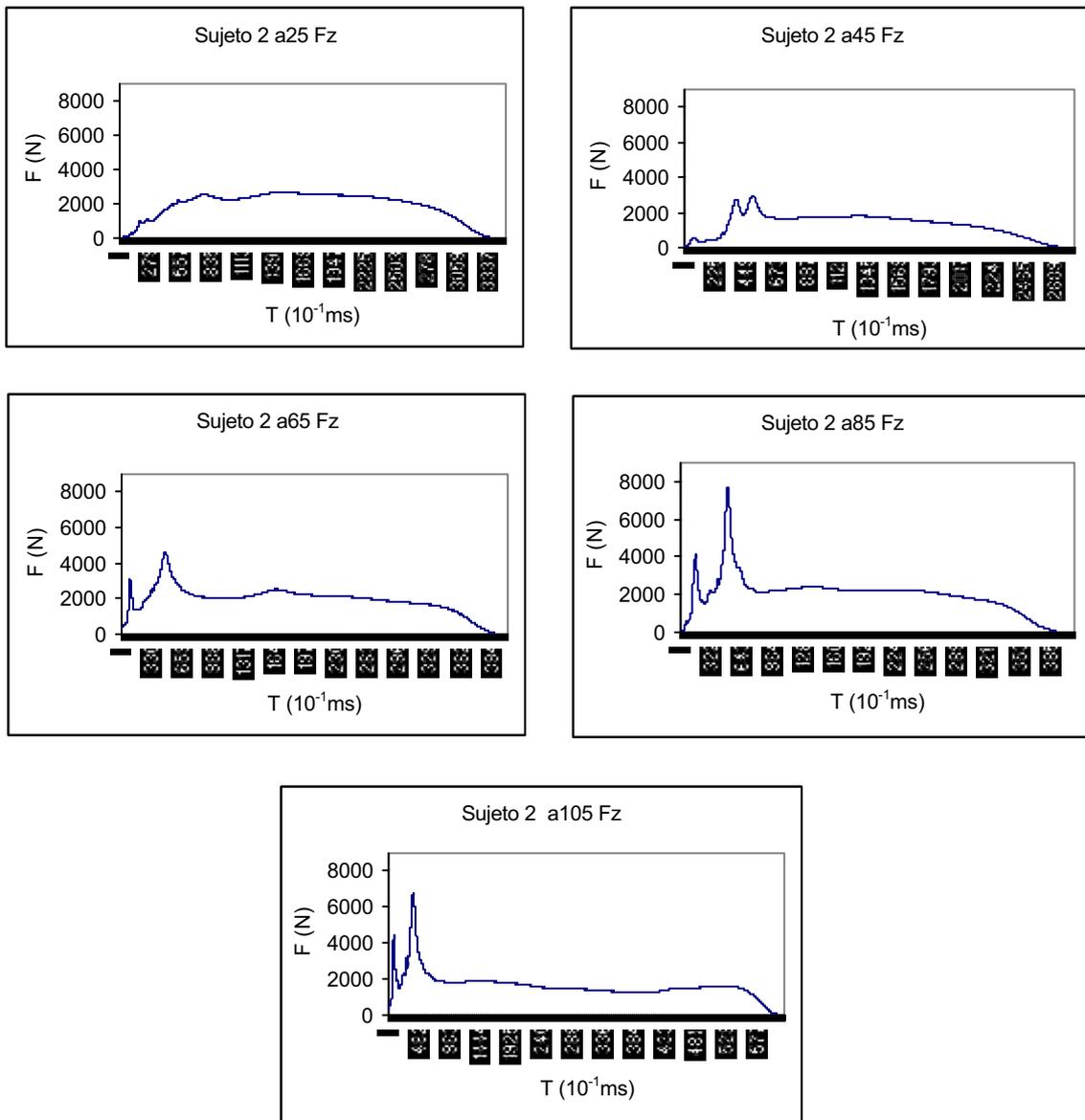


Fig. a48 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 2 en los saltos del estudio 2.B.

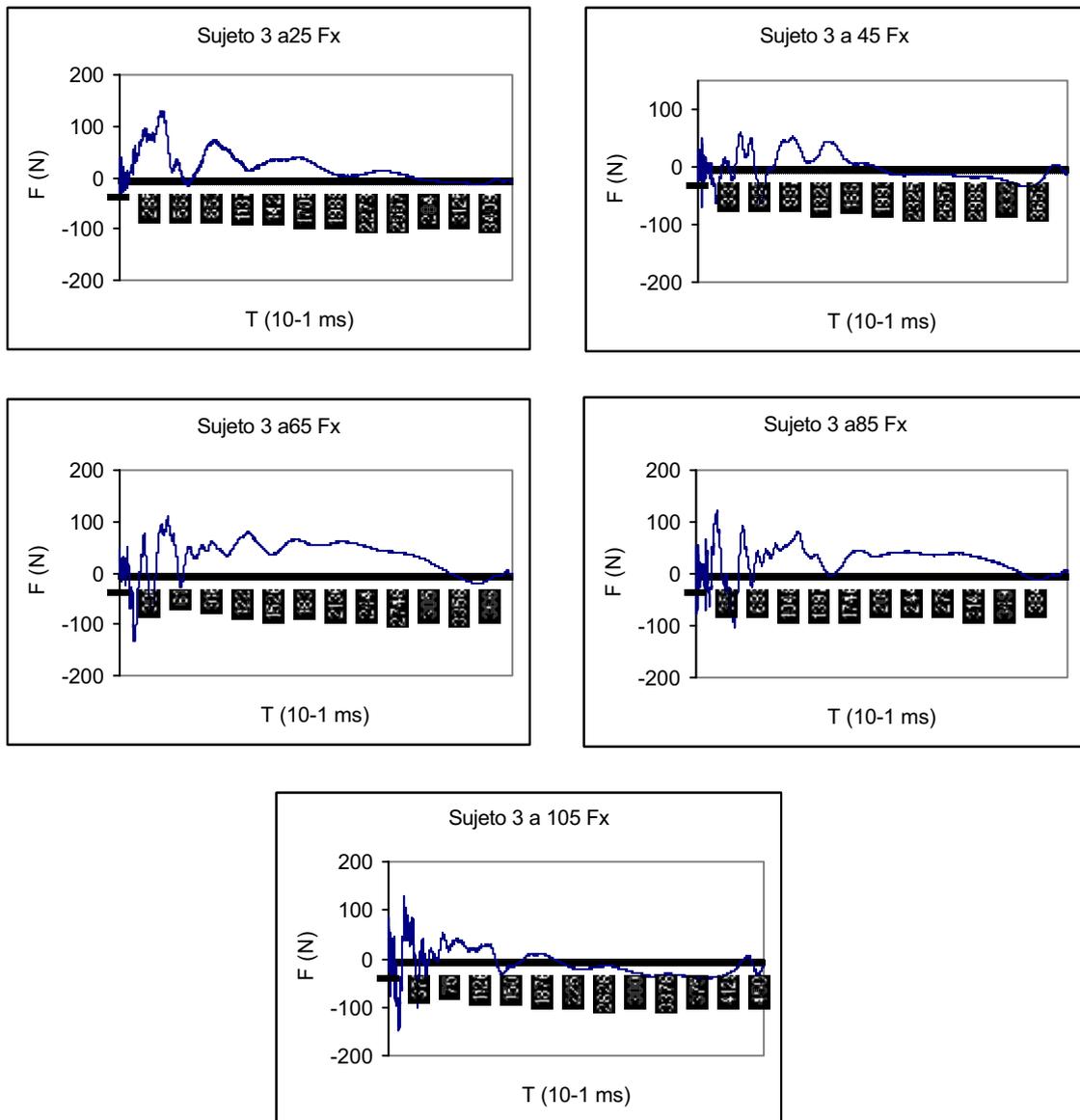


Fig. a49 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 3 en los saltos del estudio 2.B.

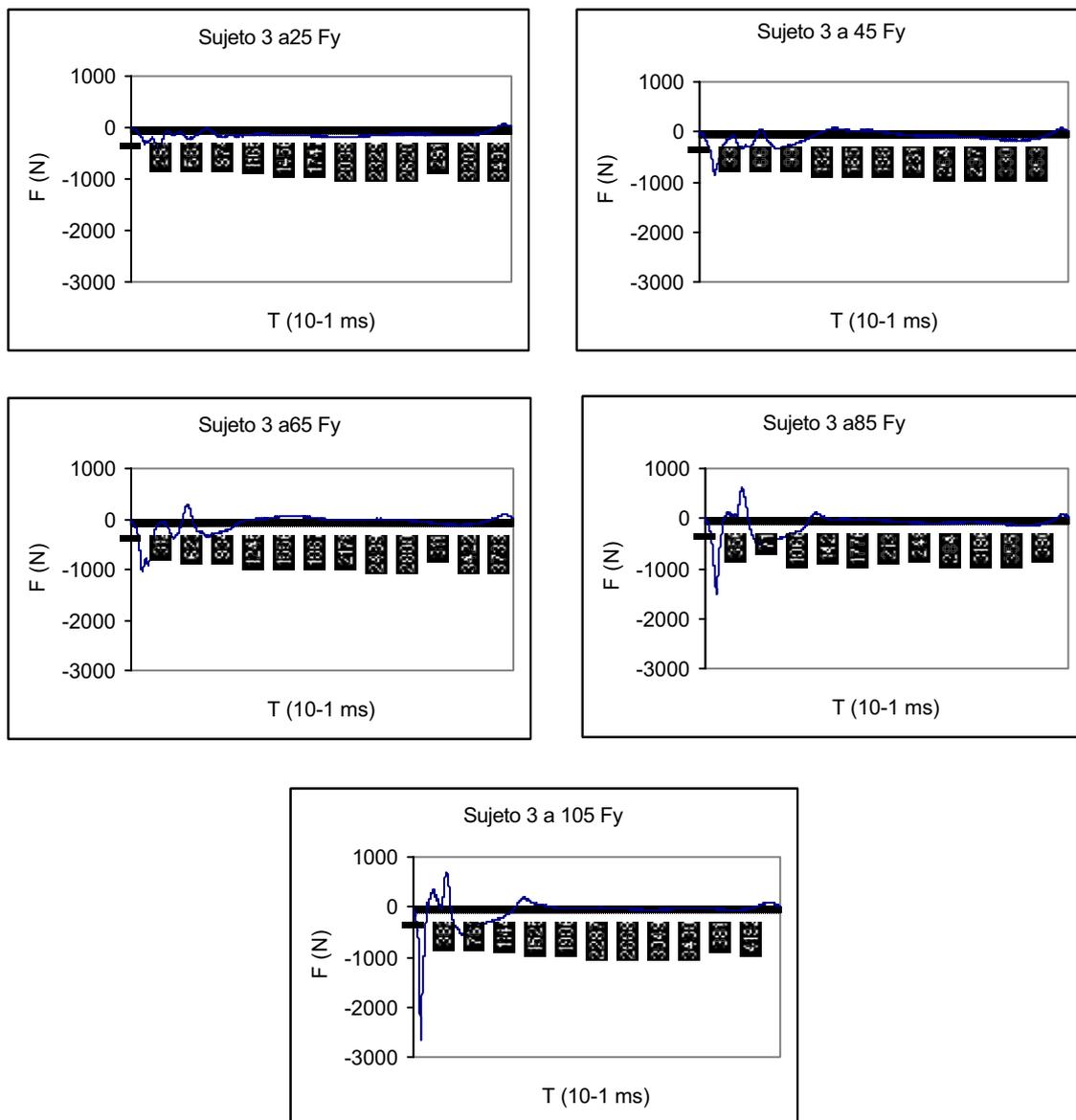


Fig. a50 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 3 en los saltos del estudio 2.B.

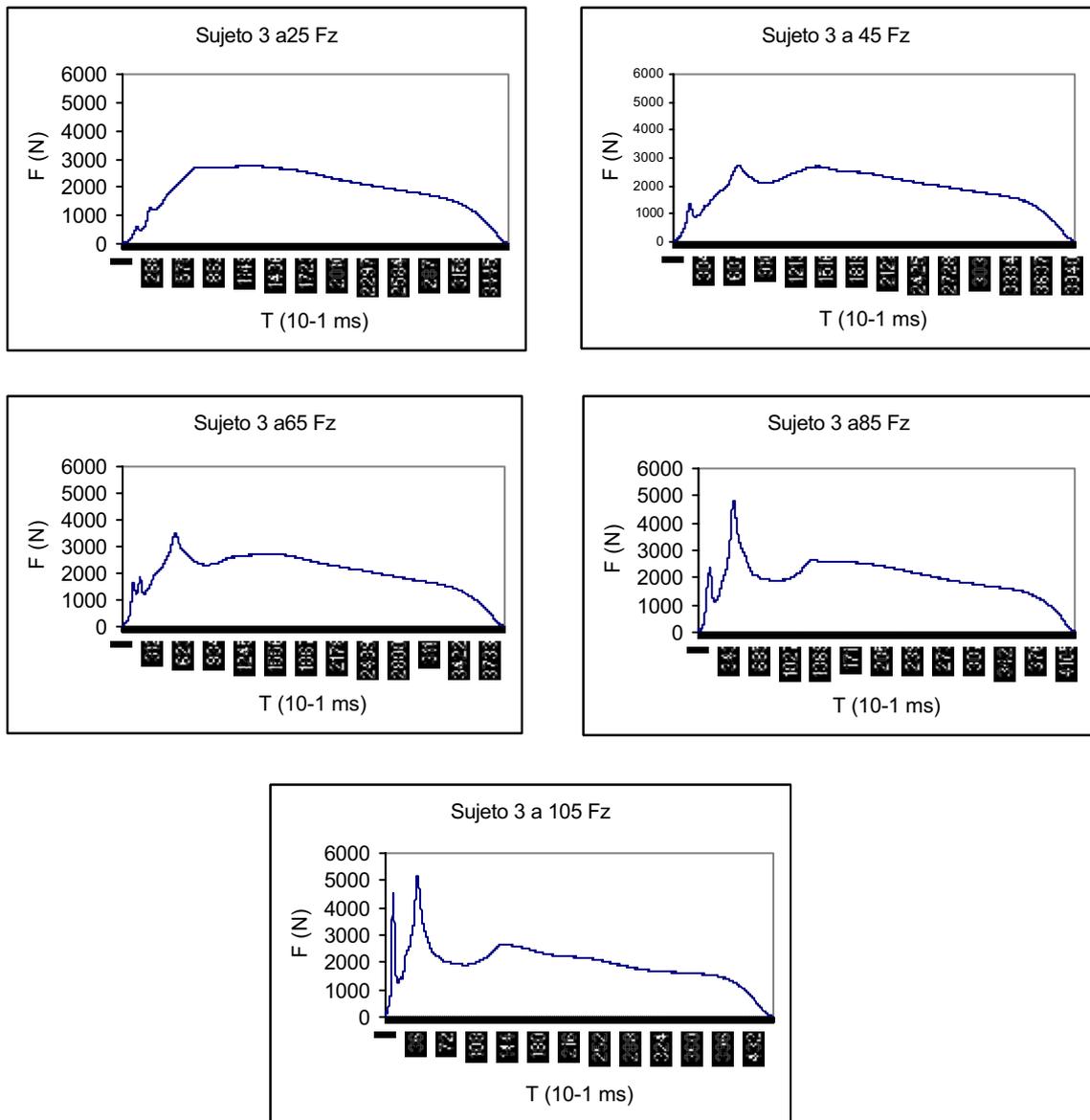


Fig. a51 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 3 en los saltos del estudio 2.B.

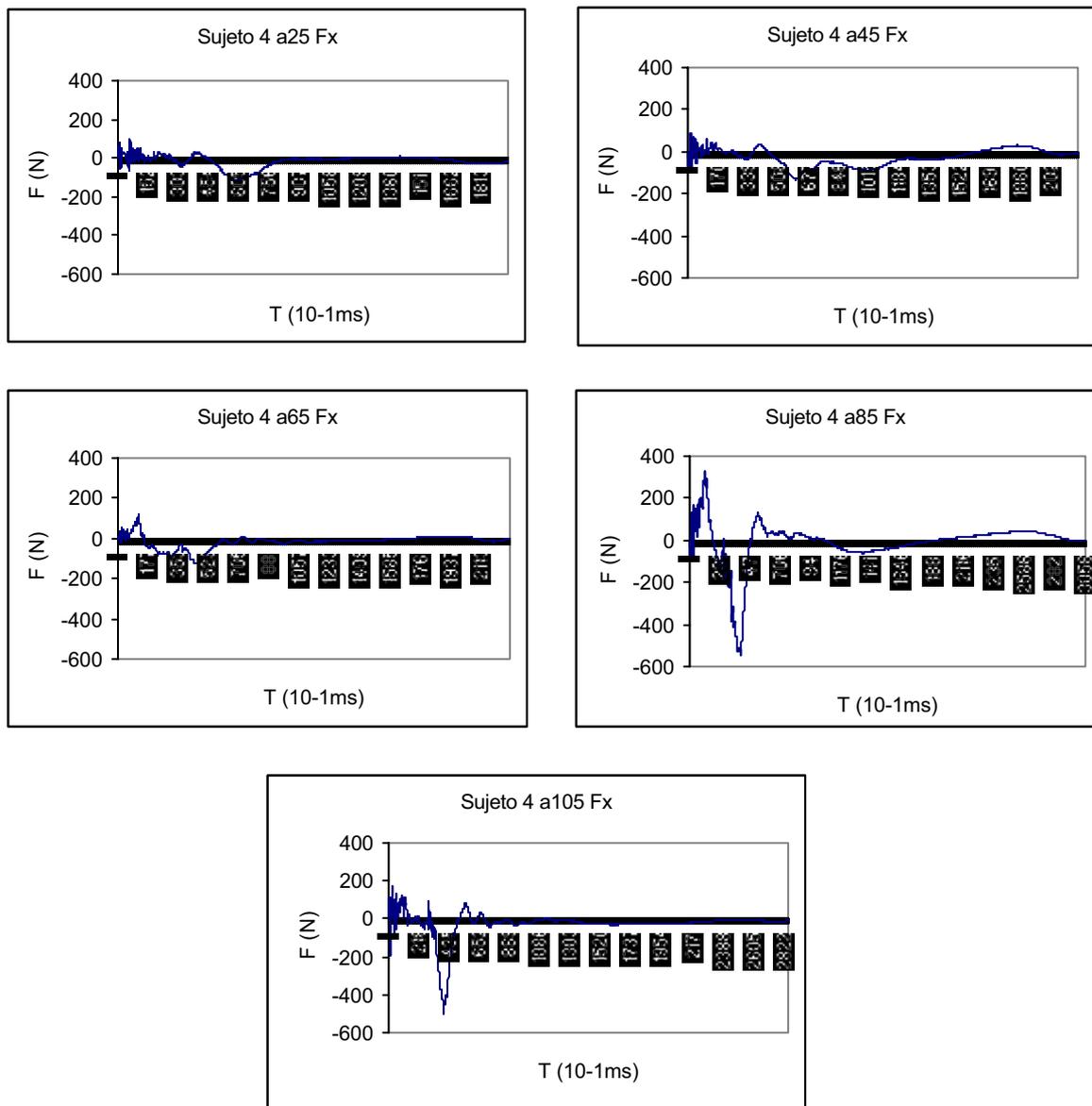


Fig. a52 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 4 en los saltos del estudio 2.B.

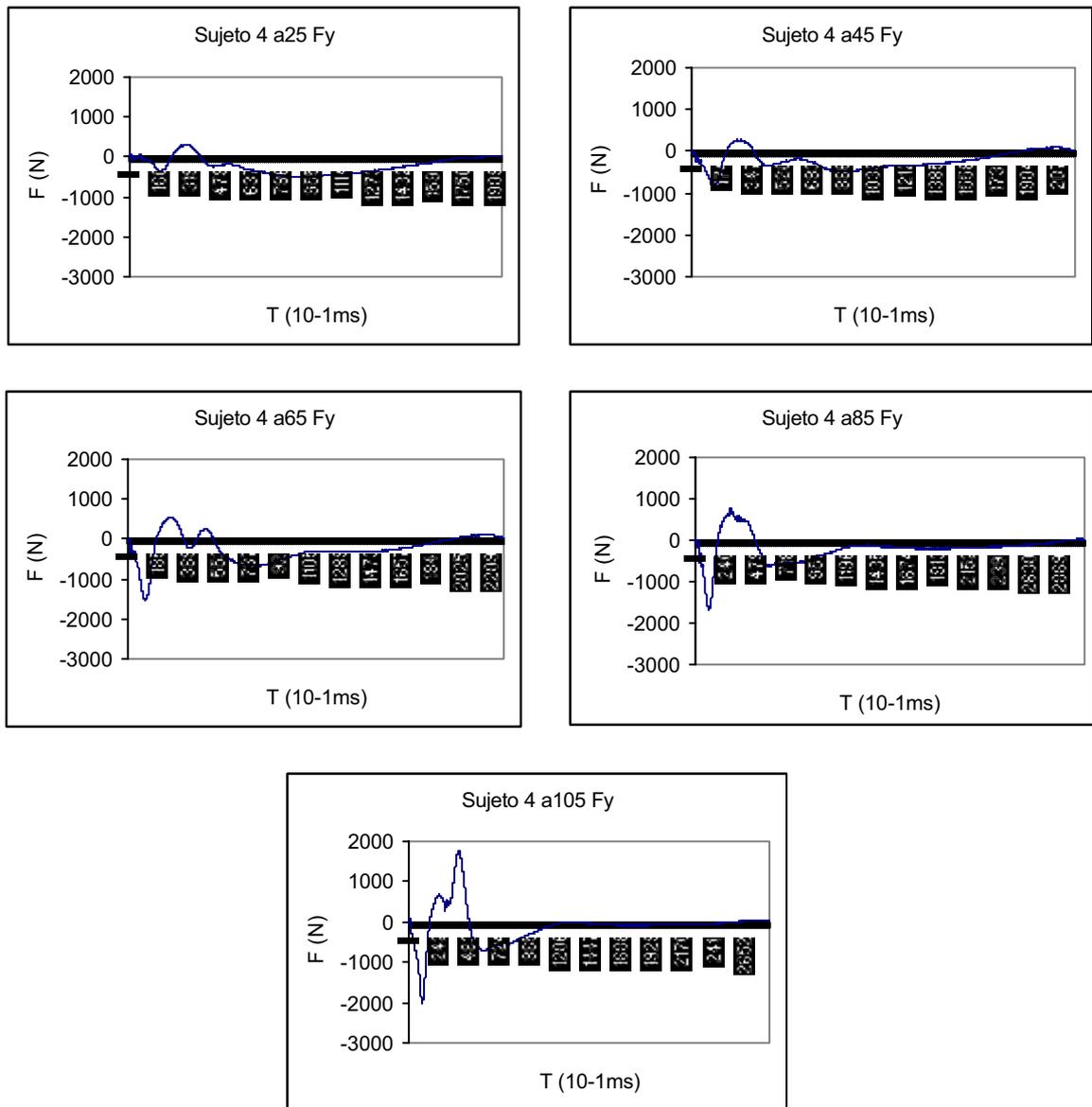


Fig. a53 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 4 en los saltos del estudio 2.B.

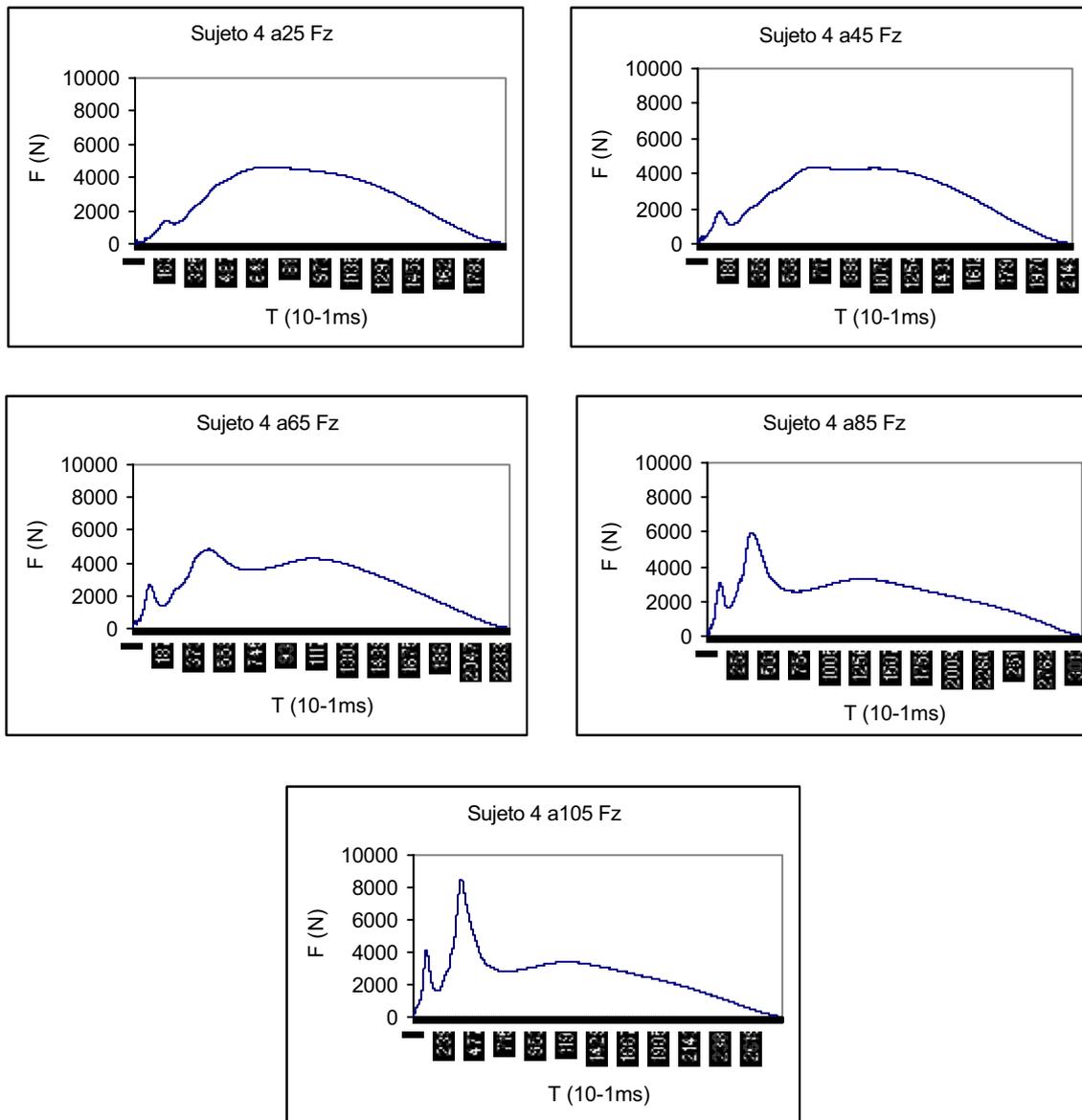


Fig. a54 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 4 en los saltos del estudio 2.B.

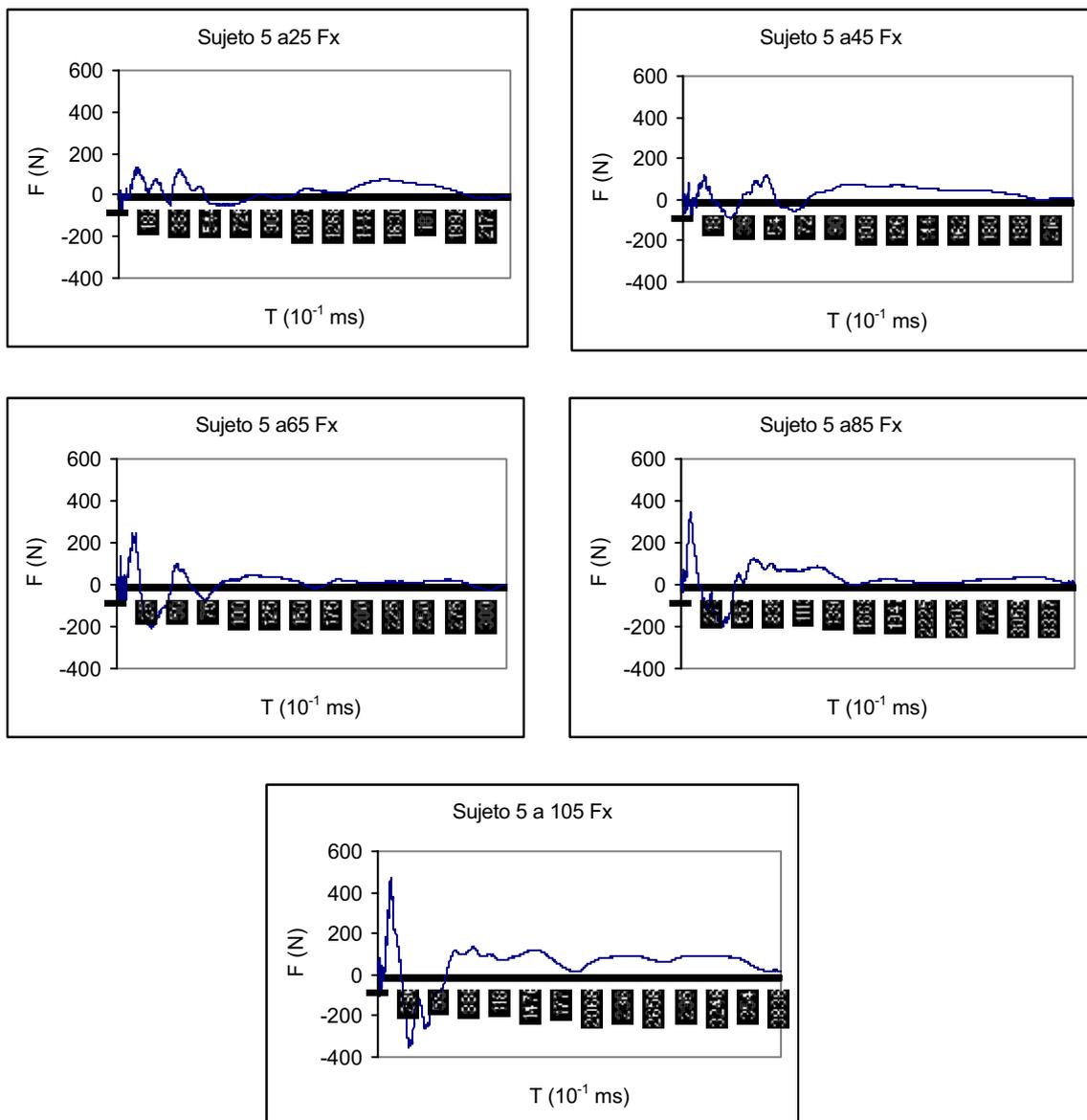


Fig. a55 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 5 en los saltos del estudio 2.B.

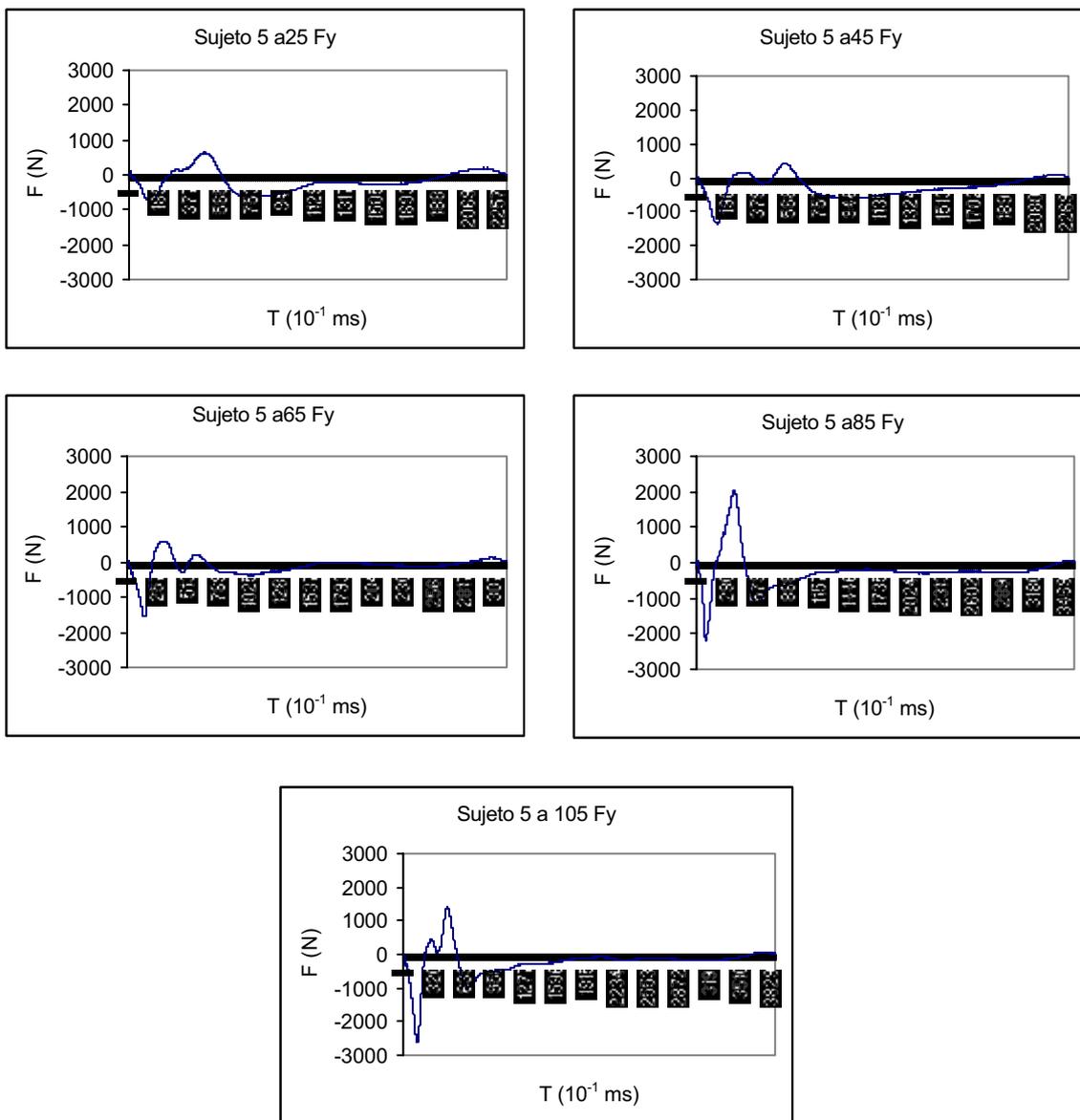


Fig. a56 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 5 en los saltos del estudio 2.B.

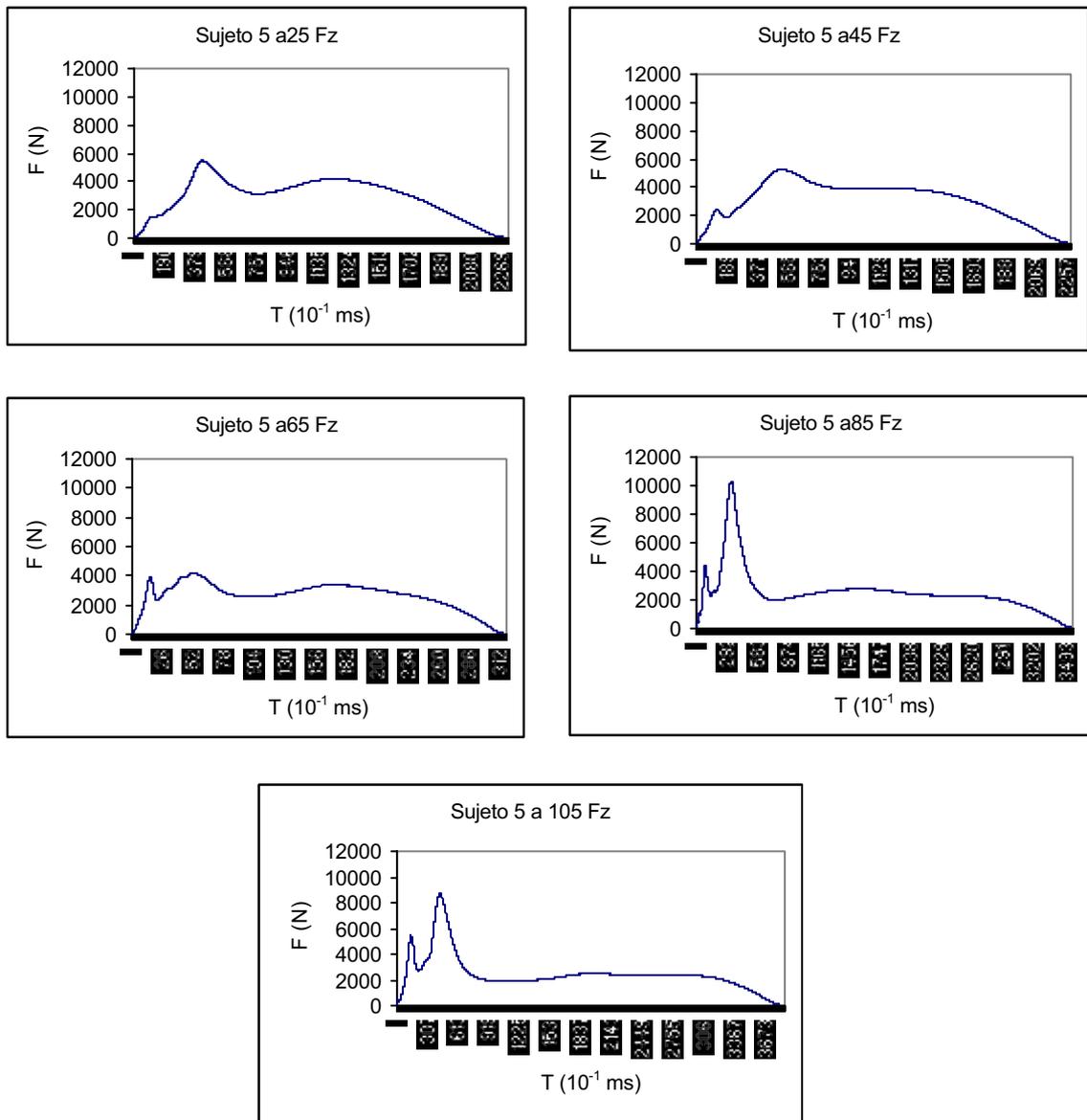


Fig. a57 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 5 en los saltos del estudio 2.B.

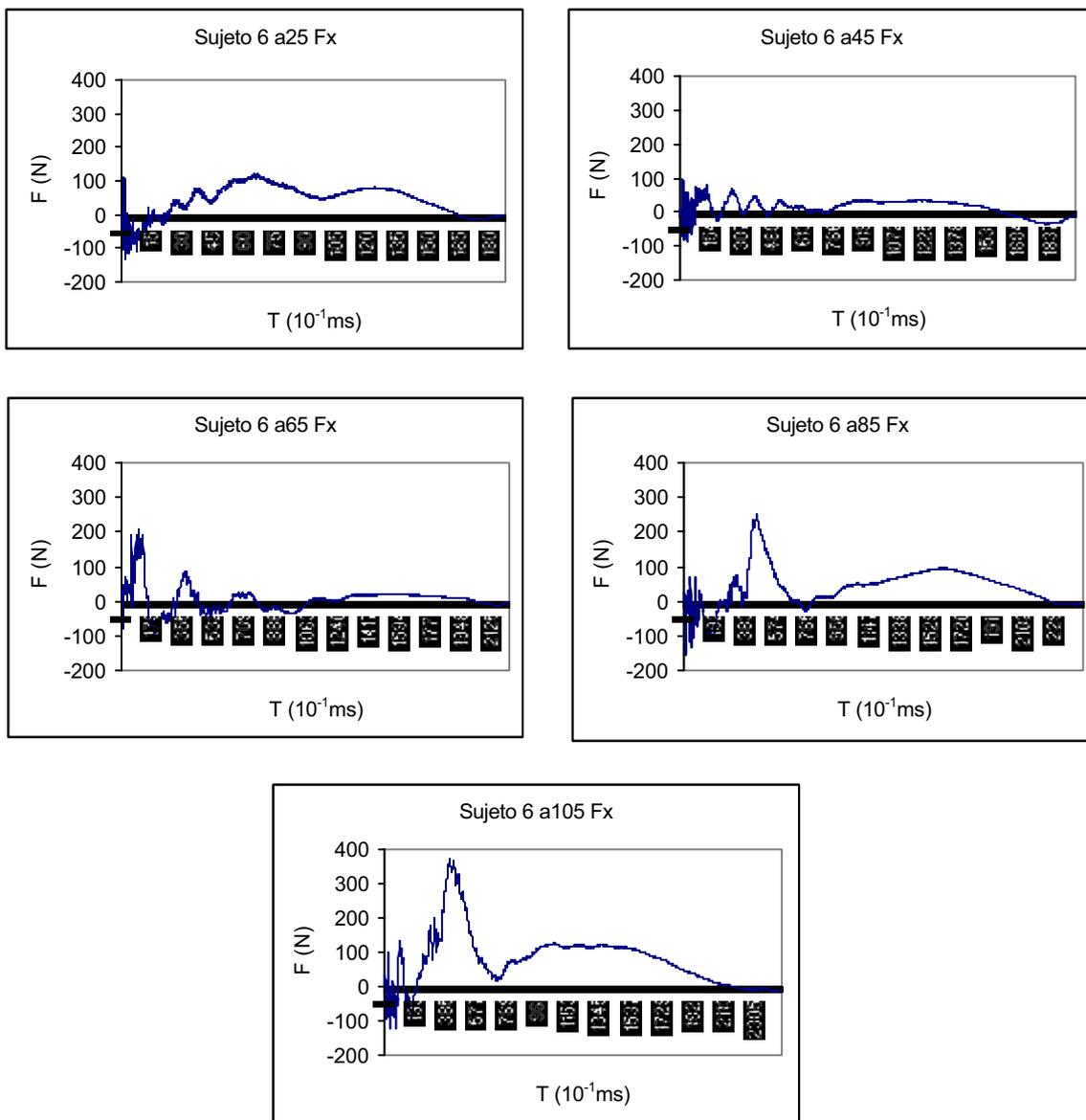


Fig. a58 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 6 en los saltos del estudio 2.B.

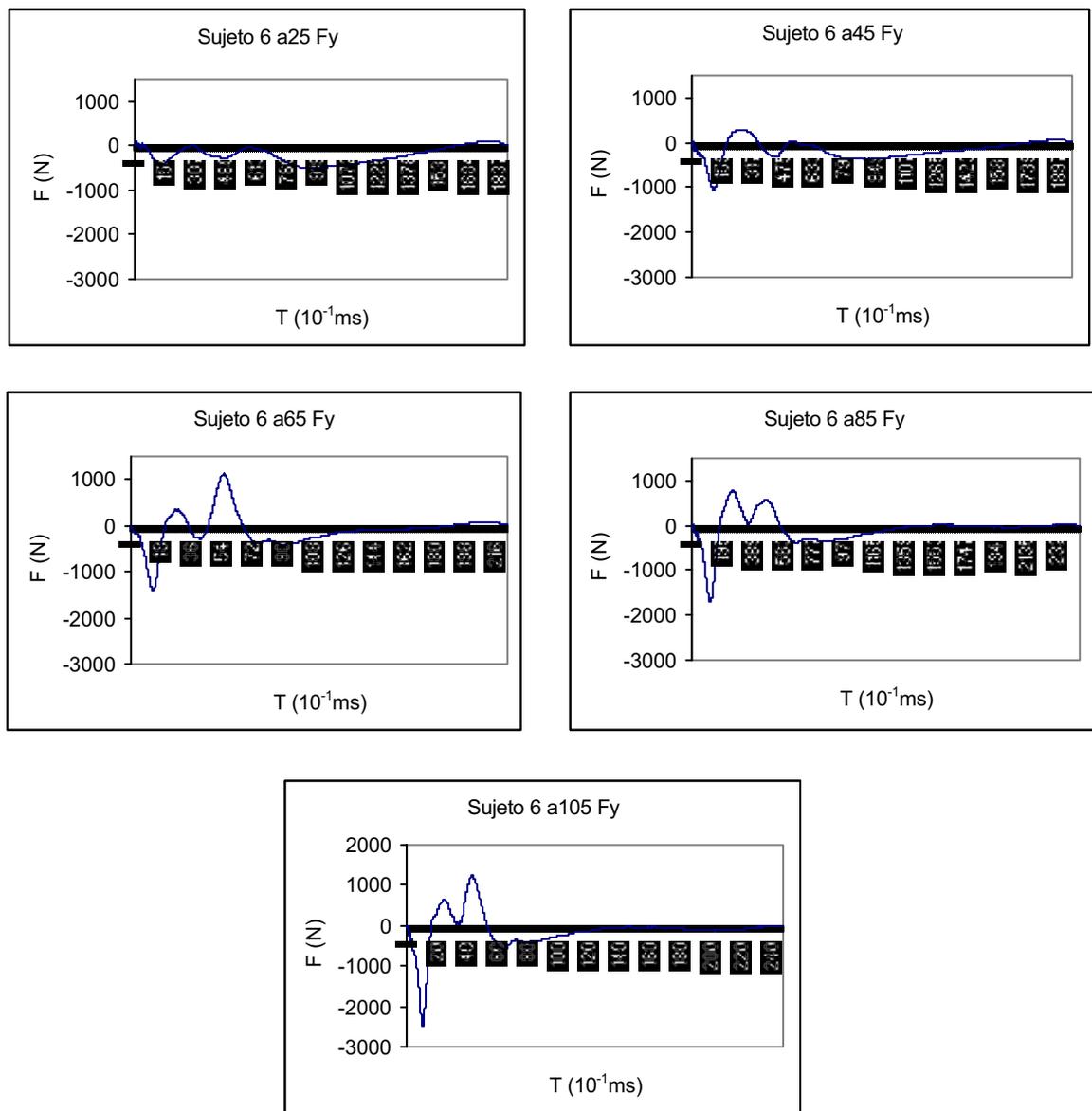


Fig. a59 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (F_y) del sujeto 6 en los saltos del estudio 2.B.

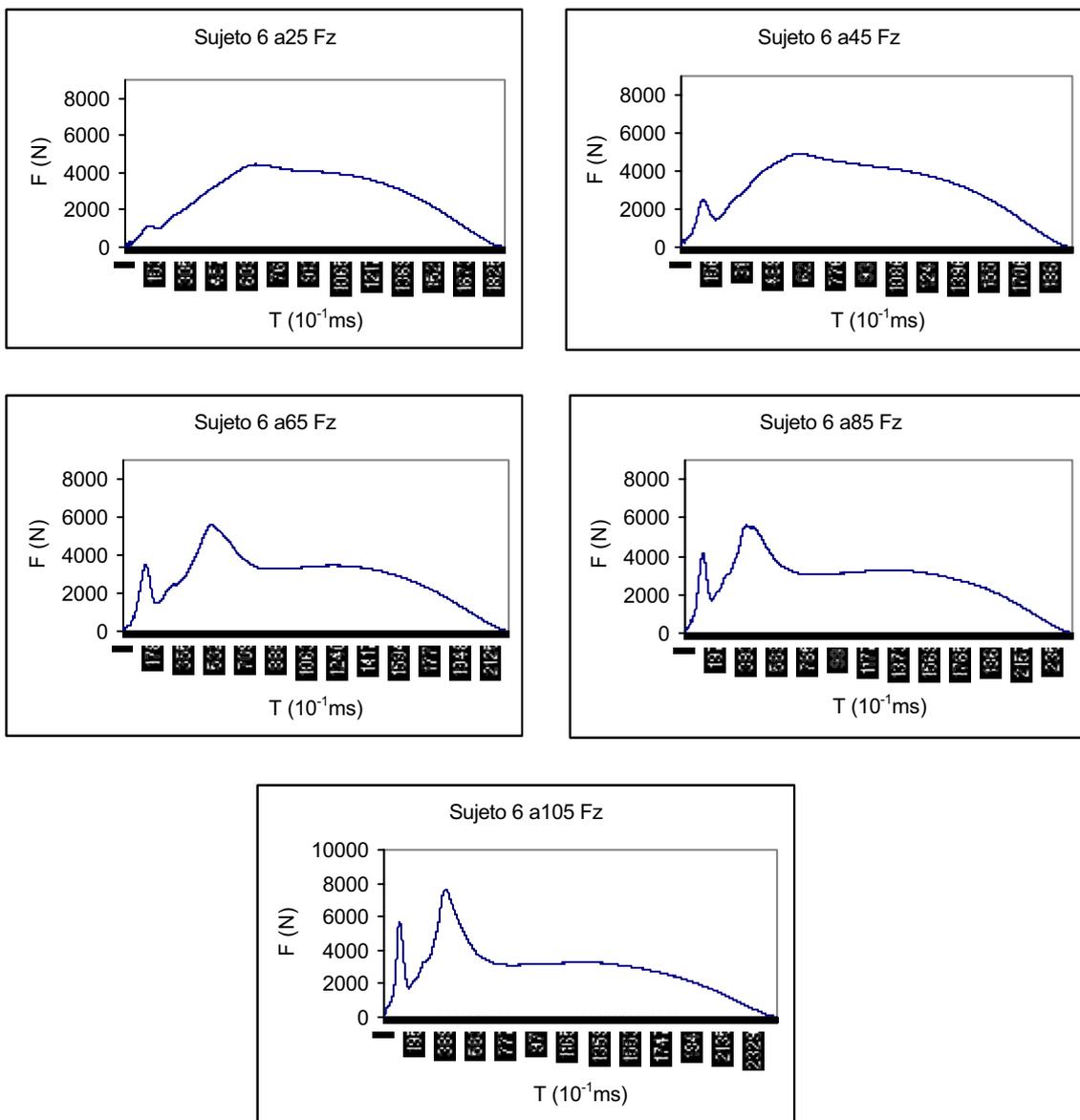


Fig. a60 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 6 en los saltos del estudio 2.B.

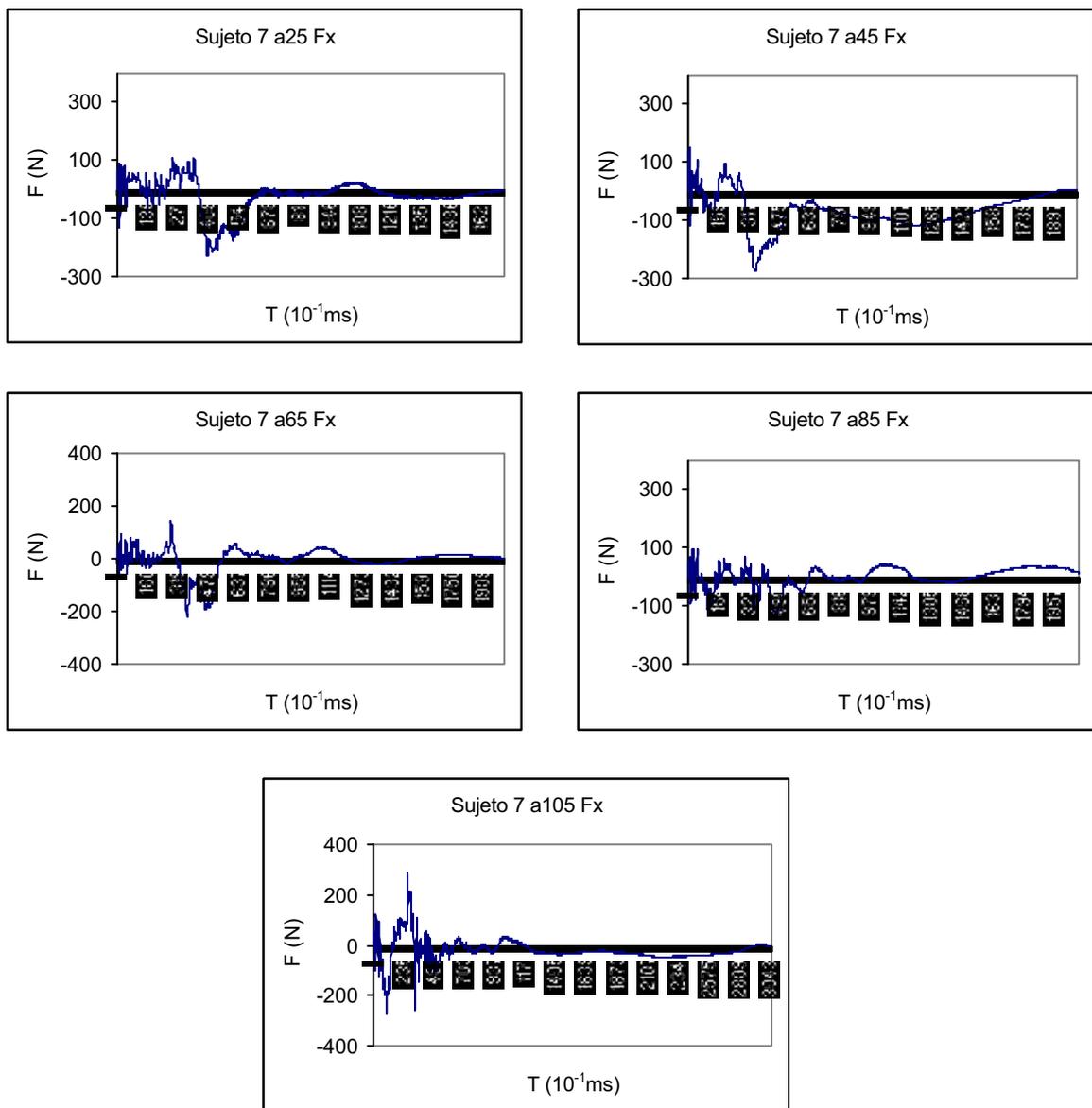


Fig. a61 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 7 en los saltos del estudio 2.B.

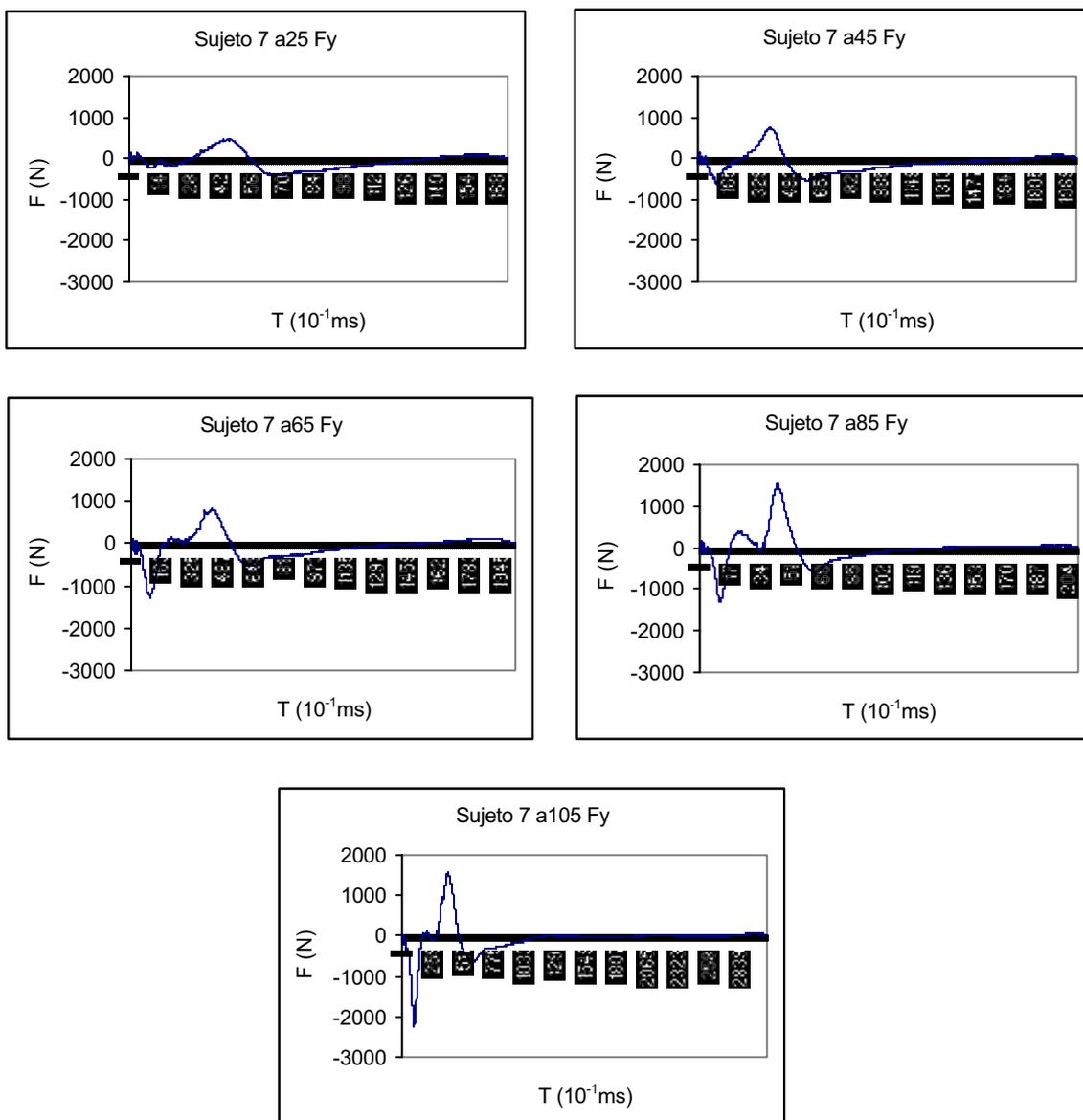


Fig. a62 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 7 en los saltos del estudio 2.B.

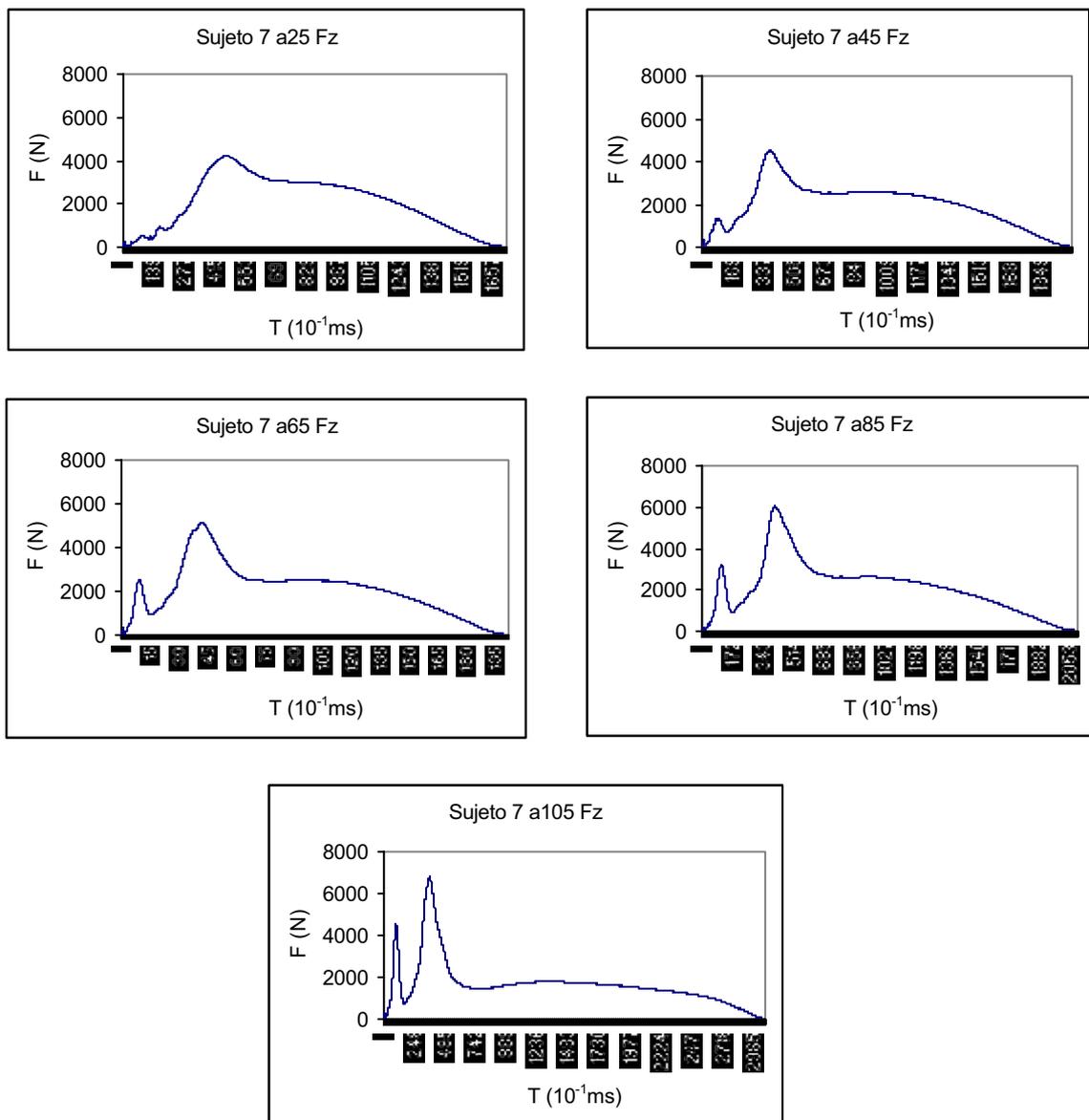


Fig. a63 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 7 en los saltos del estudio 2.B.

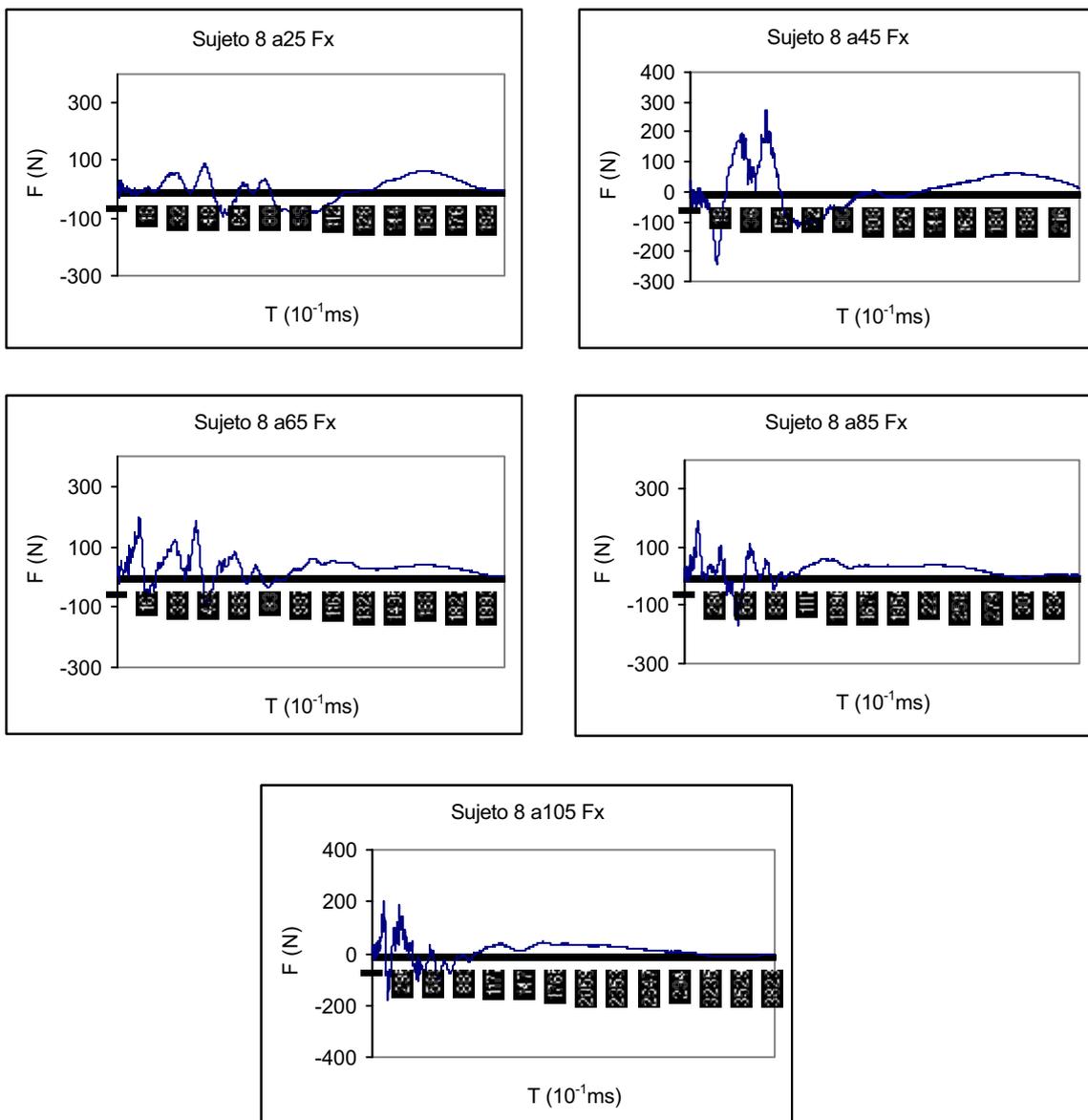


Fig. a64 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 8 en los saltos del estudio 2.B.

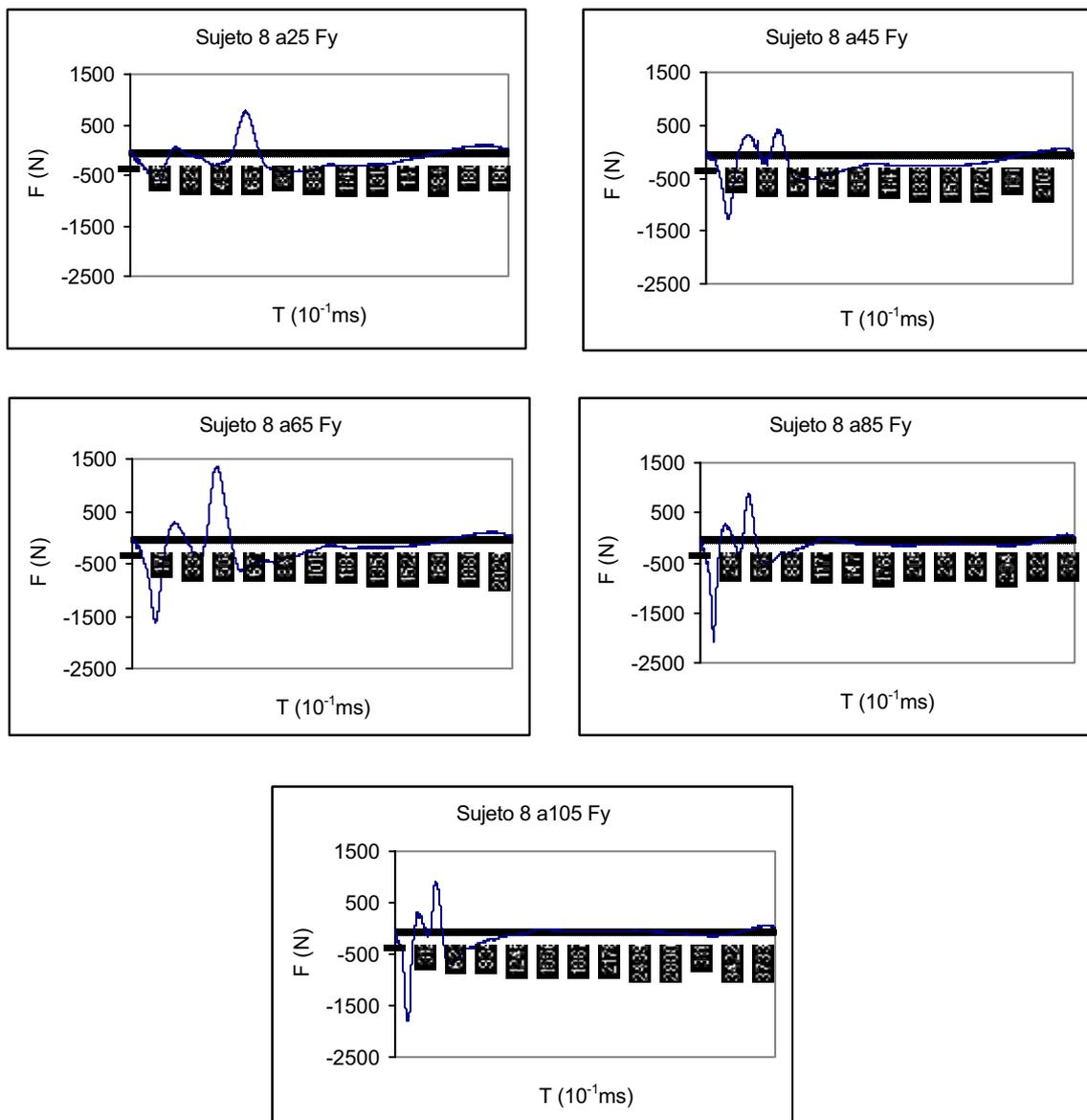


Fig. a65 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 8 en los saltos del estudio 2.B.

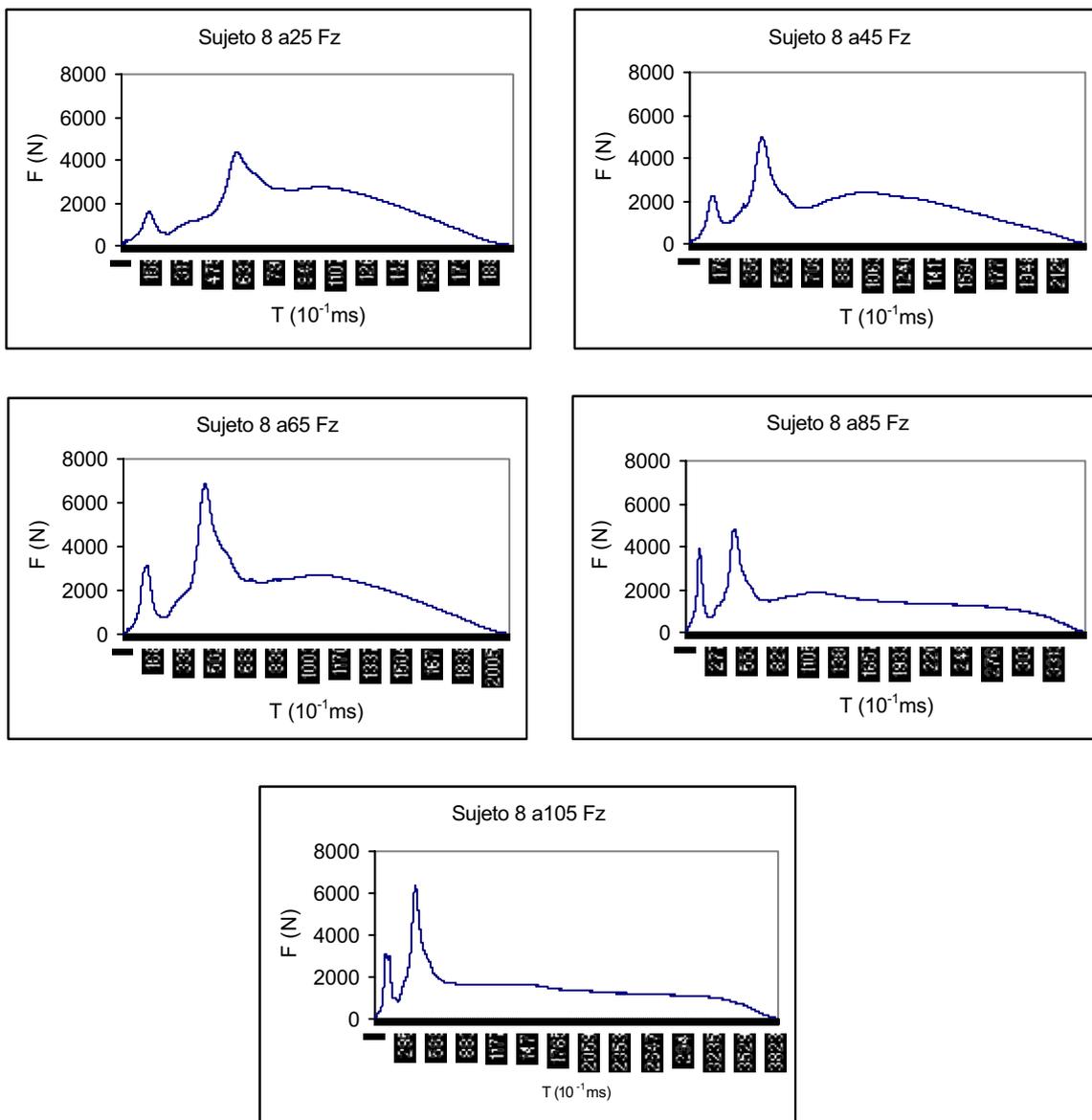


Fig. a66 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 8 en los saltos del estudio 2.B.

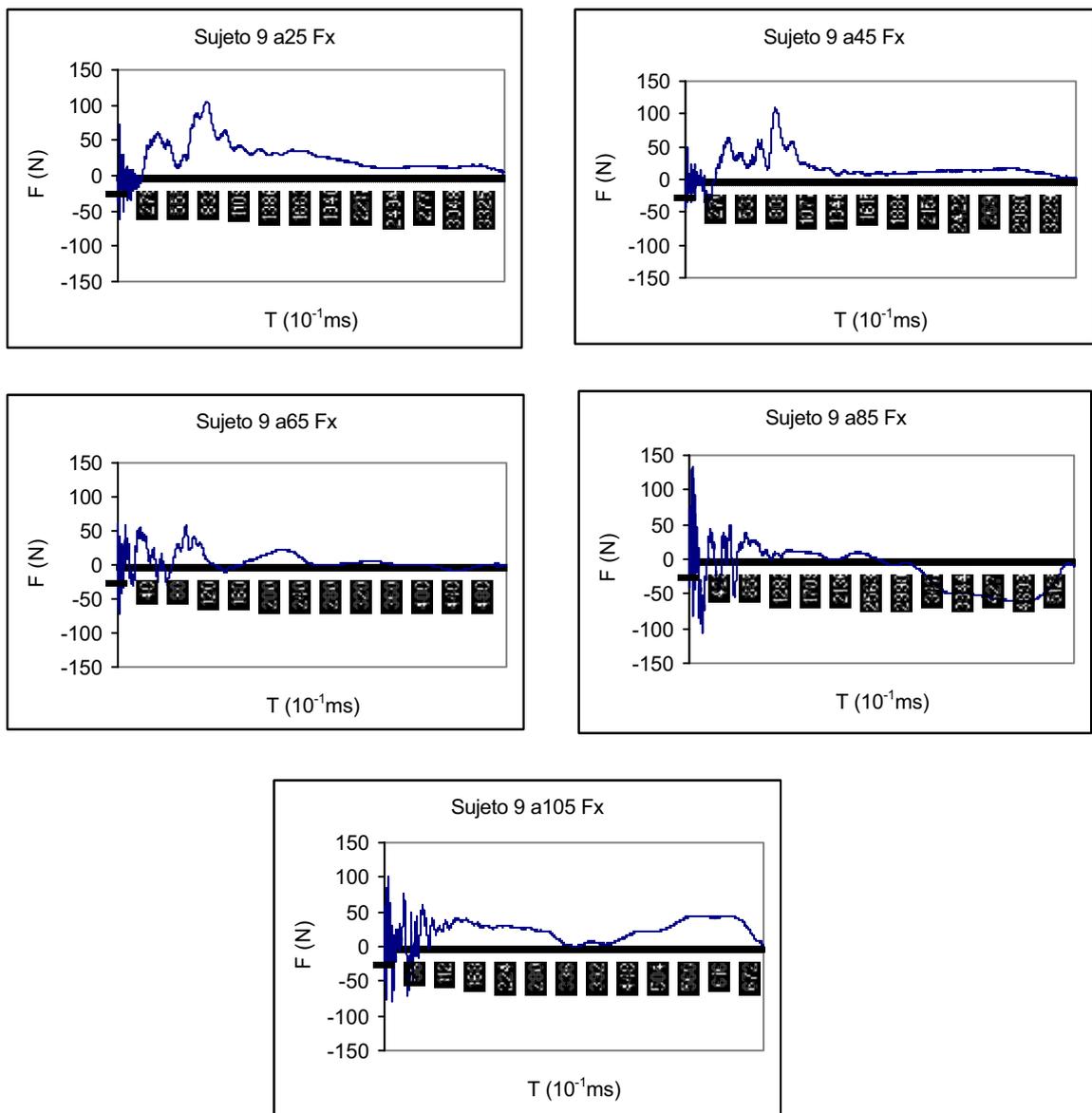


Fig. a67 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 9 en los saltos del estudio 2.B.

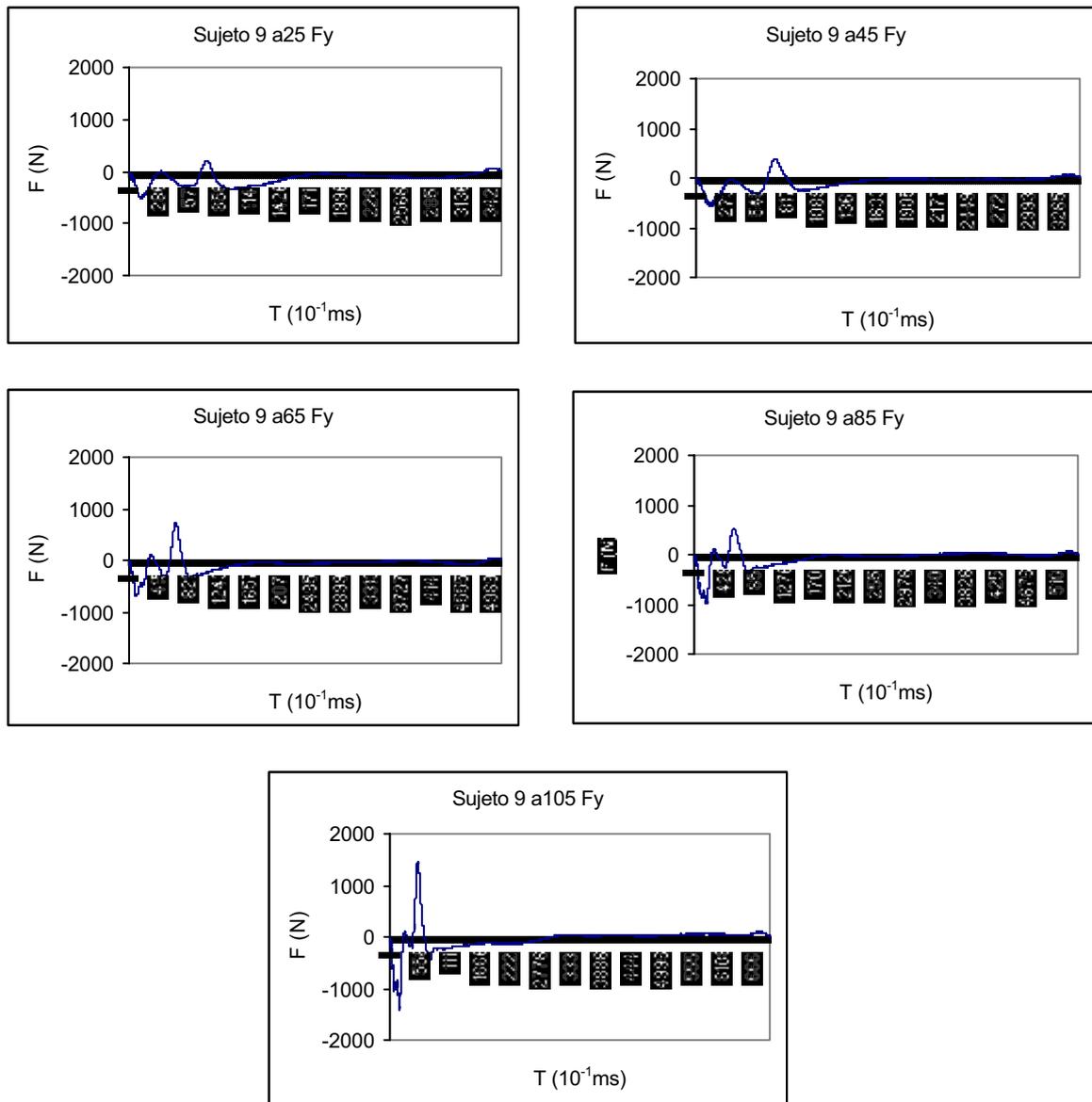


Fig. a68 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 9 en los saltos del estudio 2.B.

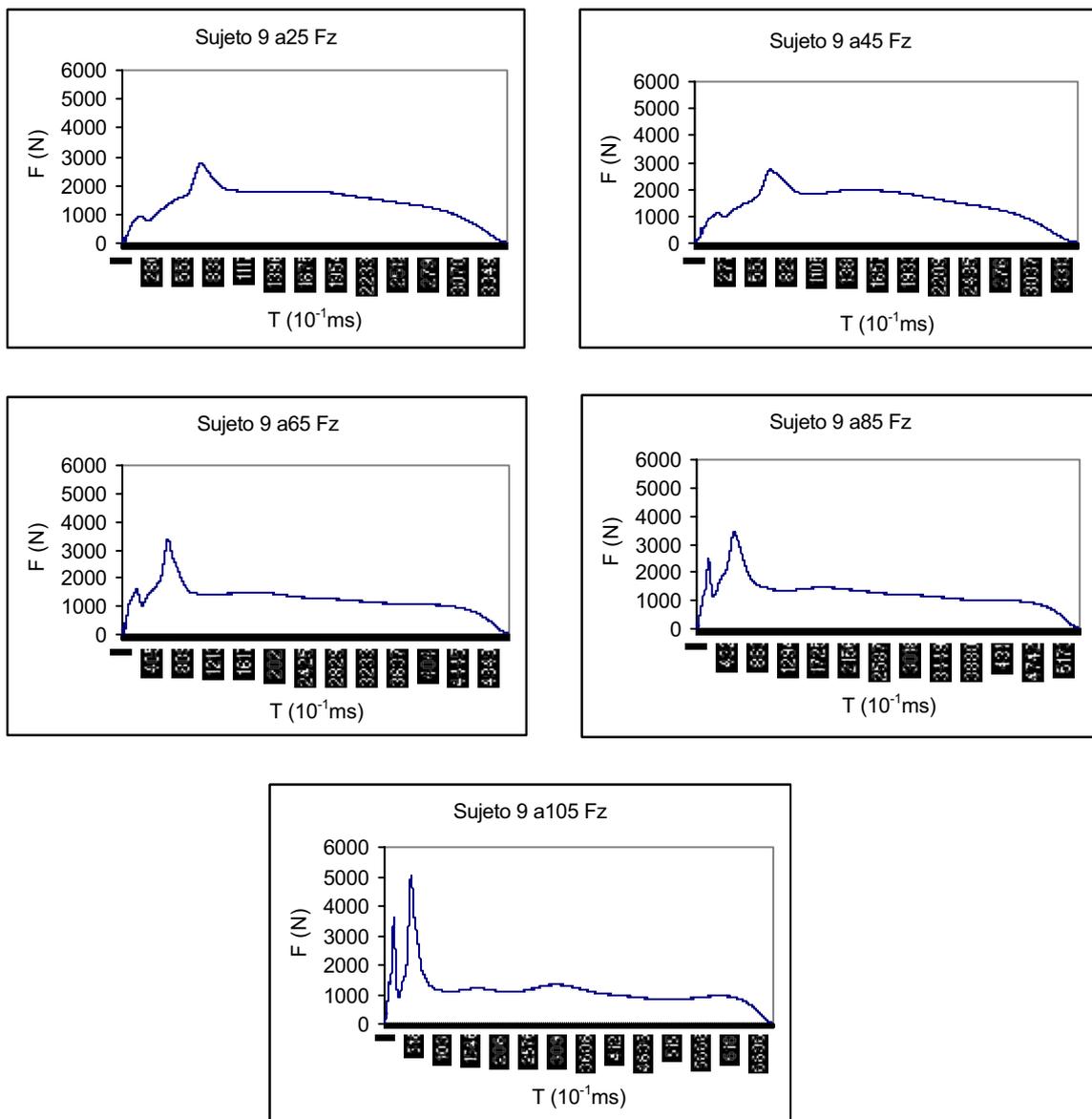


Fig. a69 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 9 en los saltos del estudio 2.B.

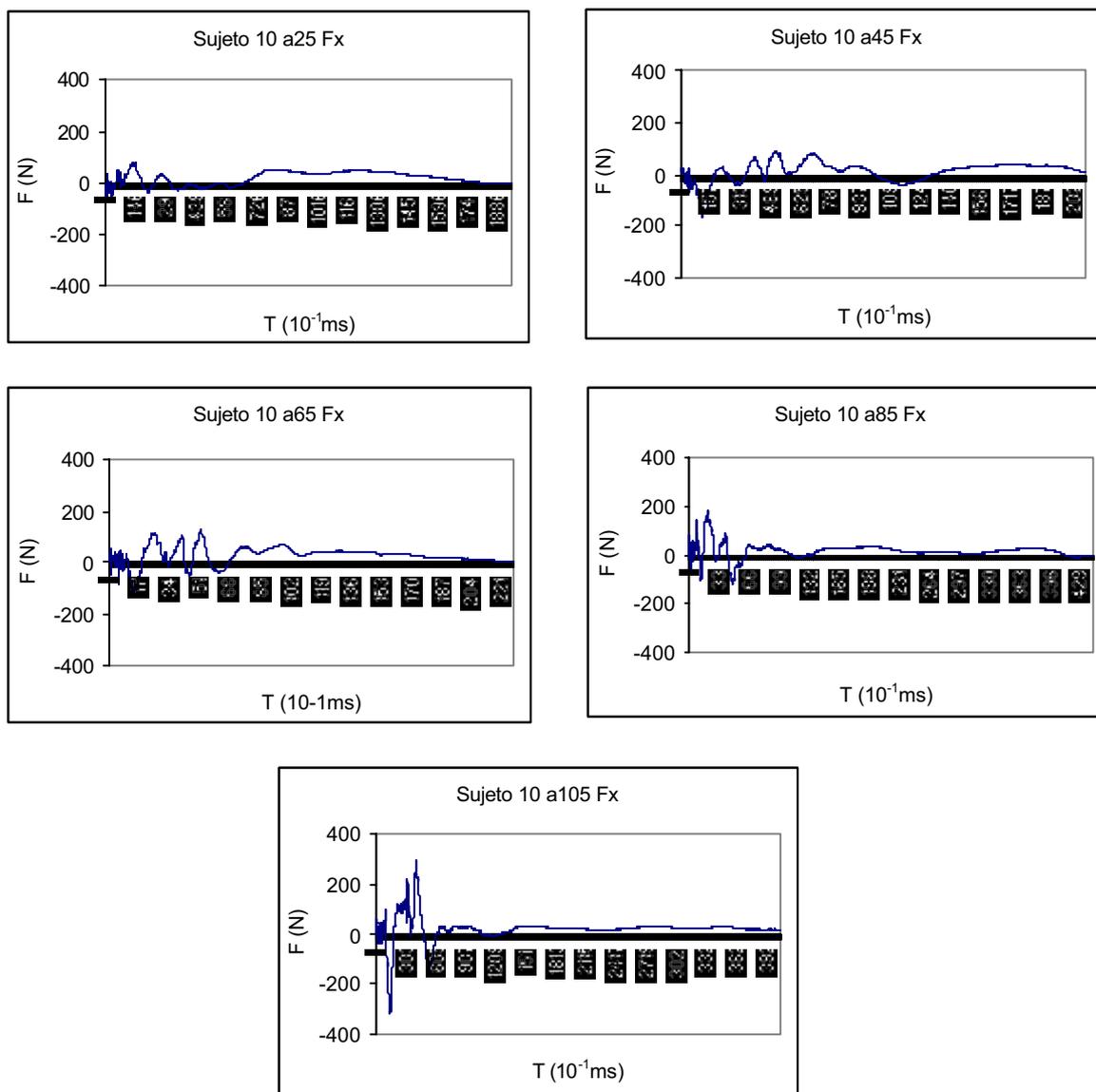


Fig. a70 Series temporales del componente mediolateral de la fuerza (Fx) del sujeto 10 en los saltos del estudio 2.B.

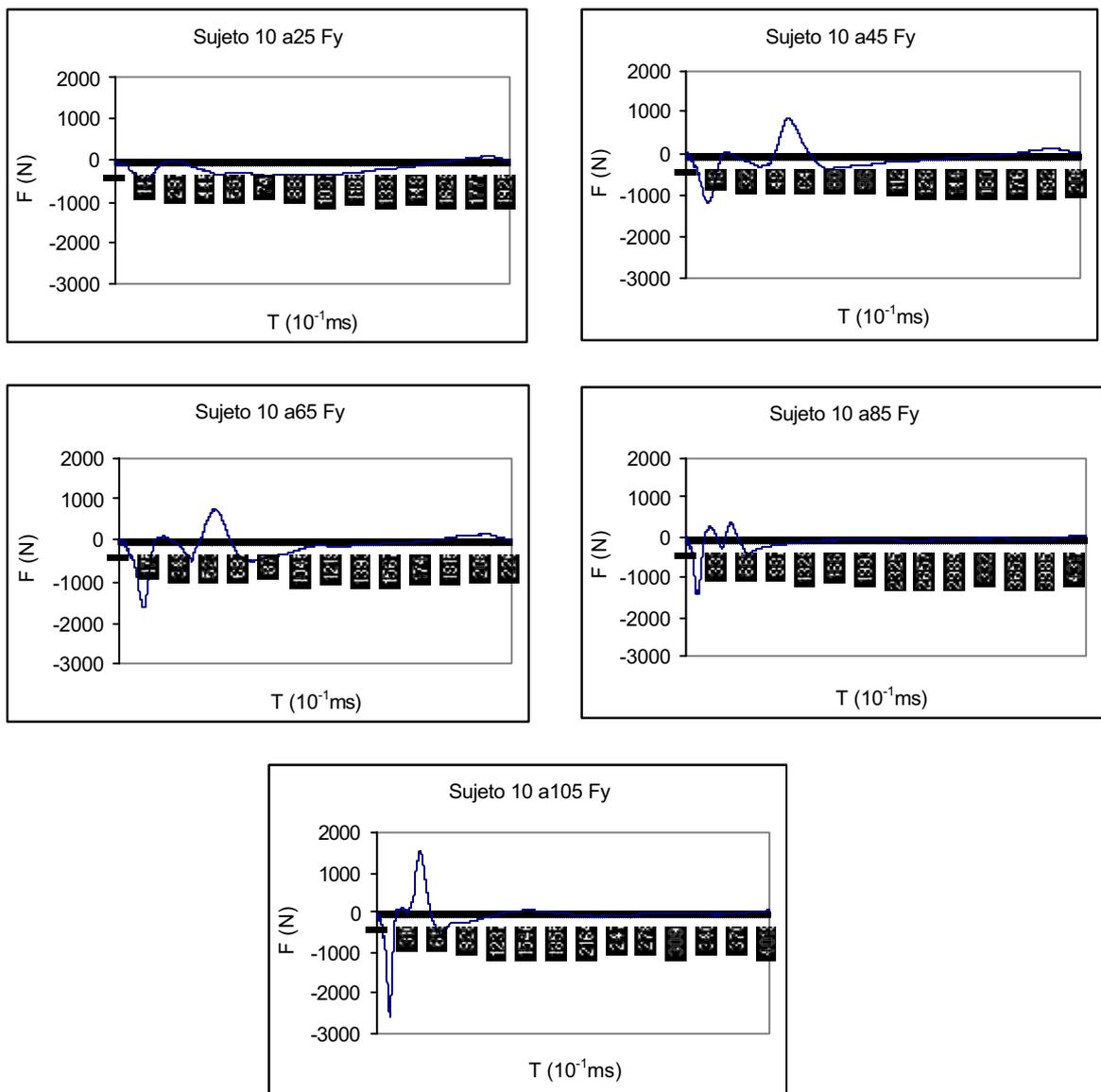
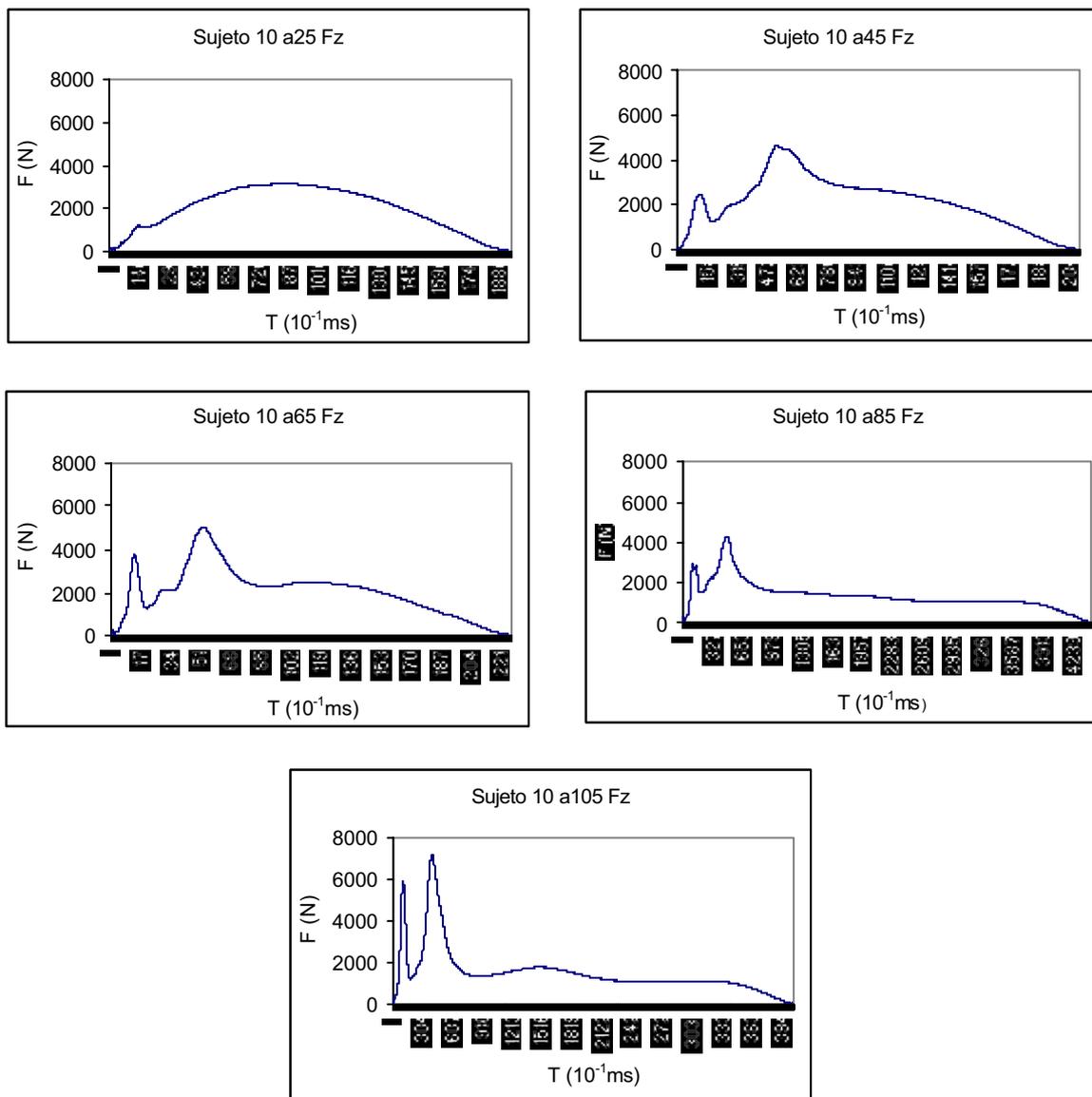


Fig. a71 Series temporales del componente anteroposterior de la fuerza (Fy) del sujeto 10 en los saltos del estudio 2.B.



ig. a72 Series temporales del componente vertical de la fuerza (Fz) del sujeto 10 en los saltos del estudio 2.B.