

Monograph

Aplicación de la Tecnología de Redes Neuronales para Desarrollar un Modelo del Rendimiento en Natación

Victor Machado Reis¹, António José Silva^{1,2}, Aldo Manuel Costa¹, Paulo Moura Oliveira^{2,3}, José Saavedra⁴, Jurgen Perl⁵, Abel Rouboa^{2,3} y Daniel Almeida Marinho¹

¹Sports Science Department of University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Vila Real, Portugal.

²CETAV, Research Centre, Vila Real, Portugal.

³Engineering Department of University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Vila Real, Portugal.

⁴Sports Science Department of University of Extremadura, España.

⁵Institute of Computer Science, University of Maiz, Alemania.

RESUMEN

Los objetivos del presente estudio fueron: a) identificar los factores que explican el rendimiento en pruebas de 200 metros medley individual y 400 metros libres en nadadores jóvenes, para poder establecer un modelo de rendimiento en esos eventos mediante métodos matemáticos no lineales a través de redes neuronales artificiales (perceptrones multicapa) y b) establecer la precisión de las redes neuronales para estimar el rendimiento. Un total de 138 nadadores jóvenes (65 varones y 73 mujeres) de nivel nacional fueron sometidos a una batería de pruebas que abarcaban cuatro dominios diferentes: evaluaciones cineantropométricas, evaluación funcional en superficies secas (fuerza y flexibilidad), evaluación funcional en natación (características hidrodinámicas, hidrostáticas y bioenergéticas) y evaluación de la técnica de nado. Para establecer un perfil en nadadores jóvenes se realizaron combinaciones no lineales entre las variables preponderantes para cada género y el rendimiento en natación en pruebas de 200 metros medley individual y 400 metros libres. Para este propósito se utilizó una red neuronal con conexión hacia delante (*feed forward*) (perceptrones multicapa) con tres neuronas en una sola capa oculta. Hay evidencia reciente que apoya la precisión de la prognosis del modelo (error inferior a 0,8% entre el rendimiento verdadero y el estimado). Por consiguiente, nosotros consideramos que el uso de la red neuronal como herramienta puede ser una buena metodología para aplicar en la resolución de problemas complejos tales como diseñar un modelo de rendimiento o identificar talentos en natación y, posiblemente, en una gran variedad de deportes.

Palabras Clave: evaluación, grupos etarios de nadadores, medley individual, libre

INTRODUCCION

En las condiciones actuales, la identificación de aptitudes representa un juicio sobre los futuros niveles de rendimiento basados en las capacidades y habilidades individuales actuales. Este hecho presenta algunas dificultades cuando es necesario tomar decisiones en el presente, sobre la aptitud futura en algún área específica. La debilidad de este pronóstico puede deberse conceptualmente a: 1) al enfoque cibernético contemporáneo de ciencias deportivas en el que los atletas son considerados como circuitos cerrados y, por eso, un estímulo de entrenamiento conduce a la producción de una

respuesta equivalente que se representa a través de un aumento en el rendimiento (Shestakov, 2000); 2) la dificultad para definir la estructura multi-factorial de rendimiento en los deportes, debida a la falta de investigaciones consistentes y a la débil conexión entre las diferentes áreas científicas que realizan este tipo de estudios.

Algunos estudios (Lees, 2002; Linder et al., 2003; Perl, 2004) intentaron aislar, a partir de una amplia gama de variables, aquellas variables que determinan mejor el éxito en la competencia. Sin embargo, a pesar de las series de valoración y de los tipos de análisis, la predicción del rendimiento es todavía imprecisa, y a menudo apunta en diferentes direcciones, lo que hace que las futuras analogías sean bastante complejas.

Otra gran cantidad de estudios basados en el modelo cibernético de rendimiento en los deportes, han enfocado los procesos de adaptación como resultado de los diferentes parámetros de entrenamiento (Aminian et al., 1995; Busso et al., 1997; Herren et al., 1999; Kurz y Stergiou, 2005; Wu y Swain, 2002).

En este enfoque cibernético, la función de cada atleta es similar a la de un circuito cerrado. En la actualidad se acepta que la robustez de este modelo lineal y simple no es adecuada para explicar el dinámico sistema del comportamiento de los deportistas, que está más influenciado por el entorno social que por el proceso de entrenamiento (Bartlett, 2006; Davids et al., 2003; Lees 2002; Linder et al., 2003).

En base a esta afirmación es necesario cambiar los conceptos de entrenamiento y adaptaciones hacia una perspectiva más sinérgica. De esta manera, aumenta el interés en la versatilidad de los métodos no lineales para modelar el rendimiento deportivo. Actualmente, estos métodos no lineales pueden ser utilizados con éxito en el campo de procesos complejos como la conducta humana o, más específicos, como el movimiento humano. Otro campo de aplicación podría ser el análisis del rendimiento deportivo (Bartlett, 2006).

Según Perl (2004), a pesar de las diferentes aplicaciones apropiadas, los movimientos son procesos dependientes del tiempo y, en este sentido, pueden ser modelados por conjuntos de coordenadas temporales (por ejemplo cada articulación tiene coordenadas geométricas). El conjunto de coordenadas de las articulaciones relevantes construye una configuración de grandes dimensiones.

Estas configuraciones (patrones) proporcionan las razones para analizar el movimiento por medio de redes neuronales (por ej. *Kohonen Feature Map - KFM*).

En el análisis del rendimiento hay por lo menos tres métodos que se utilizan frecuentemente con este propósito: El Análisis de Fourier; el Análisis del Estado Coherente (*Coherent State Analysis*) y las Redes Neuronales. Algunos autores han declarado que las redes neuronales artificiales son una herramienta calificada y válida para modelar el proceso de entrenamiento (Hahn, 2006; Liang y Liang, 2006; Shestakov, 2005).

En este contexto, en el presente estudio nos planteamos tres objetivos: a) identificar factores que puedan explicar el rendimiento en las pruebas de 200 medley individual (IM) y de 400 metros libres (FC) en nadadores jóvenes; b) establecer modelos del rendimiento en las pruebas mencionadas utilizando métodos matemáticos no lineales a través de redes neuronales artificiales (Preceptrones Multi Capa) y c) evaluar la capacidad de los modelos de redes neuronales para predecir el rendimiento en natación.

MÉTODOS

Sujetos

En este estudio participaron un total de 138 nadadores (65 varones y 73 mujeres) de nivel Nacional. Los participantes eran nadadores del mismo grupo etario y fueron seleccionados para cumplir con la evaluación técnica y de acondicionamiento. Los participantes proporcionaron su consentimiento informado por escrito y los procedimientos fueron aprobados por el comité de revisión institucional.

Si bien los participantes pertenecían al mismo grupo etario, la edad promedio de los varones era $15,9 \pm 0,4$ años mientras que la de las niñas era $13,2 \pm 0,4$ años.

Esta diferencia de edad dentro del mismo grupo etario se debe a las reglas establecidas por la LEN (Liga de Natación Europea) que solicitan que las niñas tengan dos años menos que los varones debido a que ellas poseen una maduración biológica más temprana.

Evaluaciones

Todos los sujetos fueron sometidos, durante tres días, a una batería de pruebas que abarcaban cuatro dominios de evaluación: evaluación cineantropométrica, evaluación funcional (fuerza y flexibilidad), evaluación de las funciones específicas (características hidrodinámicas, hidrostáticas y bio-energéticas) y evaluación técnica semi-cualitativa de la natación. En el primer día, se realizó la evaluación cineantropométrica y la evaluación funcional en superficies secas. En el segundo día se realizaron las pruebas correspondientes a las evaluaciones técnicas y funcionales de la natación (con 6-8 h de separación).

Para el estudio de la cineantropometría, las variables fueron seleccionadas entre las mediciones antropométricas, composición corporal y somatotipo.

Las mediciones antropométricas fueron registradas según la metodología del Grupo Internacional de Trabajo en Cinantropometría (*International Working Group on Kinanthropometry*) descrita por Ross y Marfell-Jones, 1991. La composición corporal fue evaluada mediante análisis de impedancia bioeléctrica (analizador de grasa corporal *BIA 101*, Akern Srl, Florencia, Italia) utilizando electrodos táctiles de cuatro puntos con una corriente alterna de 50 kHz, 500 μ A, después de un ayuno de toda la noche. El somatotipo fue determinado según la técnica de Heath y Carter (1966; 1967). Un total de seis pliegues cutáneos fueron medidos con un calibre de pliegues cutáneos *Slim Guide* (productos *Creative Health*, EUA). Los componentes del endomorfismo, mesomorfismo y ectomorfismo fueron calculados mediante las ecuaciones propuestas por Ross y Marfell-Jones, 1991. Para evaluar las dimensiones corporales se utilizó un estadiómetro con una escala graduada de a 0,10 cm y el peso corporal fue determinado utilizando una balanza digital con una apreciación de 0,1 kg (*Weight Tronix*, Nueva York, EE.UU). Las variables evaluadas en el dominio cineantropométrico fueron: dimensiones corporales (peso, talla, envergadura y talla sentado), longitudes corporales (largo y ancho de la mano, largo y ancho del pie, longitud de los miembros superiores e inferiores), diámetros: cresta ilíaca (ancho de la cadera), bideltoideo (ancho de hombros) y torácico sagital (profundidad del pecho), índices corporales (índice envergadura/talla e índice de masa corporal), composición corporal: masa magra y somatotipo (endomorfismo, mesomorfismo y ectomorfismo).

En superficies secas se realizaron las pruebas correspondientes a la evaluación funcional y de fuerza y flexibilidad (Carzola, 1993; Costill et al., 1992). En lo referente a las pruebas de fuerza, se realizaron determinaciones de: resistencia muscular abdominal (repeticiones máximas en 60 segundos), resistencia muscular de la zona lumbar de la columna (repeticiones máximas en 60 segundos), fuerza de impulso vertical, salto desde sentadilla (*Ergo Jump*, *Bosco System*, *Globus*, Italia), fuerza del puño (*Jackson Evaluation dynamometer System*, *Texas Instruments*, USA.) y fuerza isométrica promedio de los miembros superiores (*Jackson Evaluation dynamometer System*, *Texas Instruments*, Estados Unidos). Para el caso de la evaluación de la flexibilidad, se realizaron las siguientes mediciones con un goniómetro extensible de Gollehon (*Lafayette Instrument Co*, *Estados Unidos*) Carzola, 1993; Costill et al., 1992): flexión y extensión de tobillo, flexión y extensión de hombros y flexión y extensión del tronco.

El dominio de evaluación funcional de natación comprendió tres categorías diferentes registradas de la siguiente manera: características hidrodinámicas medidas por la distancia máxima lograda por el nadador en el desplazamiento ventral, después de un empujón contra la pared (Carzola, 1993; Costill et al., 1992); características hidrostáticas medidas por la flotación vertical y horizontal (Carzola, 1993) y las características bioenergéticas evaluadas por la velocidad de nado en el umbral láctico (LT) y valor máximo del lactato sanguíneo acumulado. Las determinaciones del lactato fueron realizadas siguiendo el procedimiento establecido por Mader et al. (1976). Los nadadores realizaron 2 carreras de 200 m libres (2x200m), al 80% y al 100% de su velocidad máxima (según sus mejores tiempos en los 200 m libres), con 30 minutos de recuperación entre las series. Luego de cada serie, se tomaron muestras de sangre del lóbulo de la oreja luego de uno, tres y cinco minutos. La concentración de lactato sanguíneo fue determinada mediante un analizador de *Accusport* (*Boheringer*, *Mannheim*, *Alemania*). El umbral de lactato sanguíneo se estableció a una concentración igual a 4 mmol.L⁻¹ y fue determinado por interpolación lineal de los puntos que relacionan el lactato sanguíneo y la velocidad de nado.

Para evaluar la eficiencia técnica se realizó una evaluación técnica semicualitativa de la natación. Los errores detectados fueron registrados en una lista de control de observación de criterio. Cada nadador realizó una prueba máxima de 4x25 m en cada uno de los estilos de natación: mariposa, espalda, pecho y libre. La recuperación entre las pruebas fue de 30 min y el orden de los estilos de nado fue establecido al azar. Cada prueba fue filmada por debajo y por encima del agua en el plano sagital con cámaras *JVC- SVHS* sincronizadas. Ambas imágenes fueron compaginadas mediante una tabla de mezclado *Panasonic WJMX50*. Para obtener una imagen final dual media, el eje óptico de cada cámara de video fue colocado paralelo al otro. Ambas cámaras de video proporcionaban imágenes en el plano sagital debido a que fueron colocadas en la pared lateral de la piscina, 30 centímetros por debajo del agua y 30 centímetros por encima de la superficie de la misma. Las cámaras fueron colocadas a 7,5 m de distancia con el eje óptico perpendicular al plano de desplazamiento de los nadadores. Una tercera cámara subacuática fue colocada en el plano frontal, con el eje óptico perpendicular al eje óptico de las otras dos cámaras a 5 m de distancia. La imagen de la tercer cámara fue sincronizada con las imágenes de las cámaras colocadas en posición sagital mediante un sistema de enfoque sincronizado tradicional,

visible en el campo visual de cada cámara colocada (Vilas-Boas, 1996).

Sobre las imágenes que se registraron utilizando el sistema de observación se realizó una evaluación técnica semicualitativa del nado (Chollet, 1990; Costill et al., 1992; Maglischo, 2003). Cada observación fue cuantificada en base al criterio relativo de faltas técnicas (Reischle, 1993), dónde los diferentes puntos representan la efectividad de nado.

Las variables medidas en cada uno de los estilos de natación fueron subdivididas en cuatro criterios principales: equilibrio corporal, acción de los brazos, acción de las piernas y sincronización de los movimientos.

Rendimiento

Los mejores rendimientos obtenidos en los 400 m FC y 200 m IM fueron utilizados como variables dependientes. Se consideró el mejor tiempo registrado en cada prueba más cercano al momento de evaluación. Dichos tiempos fueron convertidos en puntos según el "Sistema Internacional de Recuento de Puntos" (IPS) (www.swimnews.com, Canadá).

Este sistema fue usado y validado para cualquier tipo de competencia, tal como se demostrara en el sistema de puntuación en la Serie de la Copa Mundial FINA 2003. El sistema clasifica los valores para cada rendimiento en una escala que varía de 0 a 1100 puntos, que corresponden a los rendimientos en las categorías mundiales.

La Tabla 1 presenta las puntuaciones promedio del rendimiento en las dos pruebas consideradas en este trabajo.

	400 metros FC		200 metros IM	
	Tiempo Promedio (min:seg)	IPS	Tiempo Promedio (min:seg)	IPS
Varones (n = 65)	4:29.56 (0:24,12)	680 (54)	2:24,45 (0:12,21)	658 (60)
Mujeres (n = 73)	5:02.95 (0:35,37)	652 (73)	2:46,09 (0:19,92)	613 (75)

Tabla 1. Puntuaciones promedio del rendimiento de los sujetos en 400 m FC y 200 m IM. Los datos se presentan como media (\pm DS).

Análisis Estadísticos

Para todas las variables se calculó la media y desviación standard (DS). Para verificar que los datos presentaran distribución normal se aplicó el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y el test de Levine fue aplicado para verificar la homogeneidad de las varianzas. Para evaluar la asociación entre las variables se utilizaron los coeficientes de correlación

Momento Producto de Pearson o de Spearman según correspondiera en cada caso. Los datos fueron analizados mediante el software SPSS 10.1 (Chicago, IL). El nivel umbral de significancia fue fijado en $p < 0,05$.

Teniendo en cuenta la validez interna (validez intraobservador e interobservador) de la evaluación técnica semicualitativa, se realizó una nueva evaluación a un grupo seleccionado al azar que abarcó el 75% de los nadadores. Cada uno de estos nadadores fue evaluado dos veces por el mismo observador y una tercera vez por otro especialista.

Las primeras dos evaluaciones (realizadas por el mismo observador) fueron realizadas con un intervalo de un mes. La tercera evaluación (realizada por un observador diferente) fue realizada en el mismo momento en que se realizó la segunda evaluación (efectuado por el primer observador).

Después de la evaluación técnica semicualitativa, se realizó el análisis de concordancia de las mediciones obtenidas por los diferentes observadores (inter) y por un mismo observador (intra), utilizando el Índice Kappa de Cohen para las variables ordinales y el coeficiente de correlación R de Spearman para las variables de proporción.

En la Figura 1 se observa el modelo de rendimiento expresado mediante una red neuronal con conexión hacia delante con tres neuronas en una capa oculta.

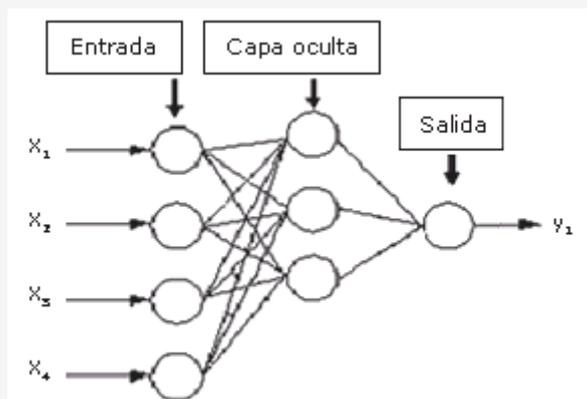


Figura 1. Red neuronal con conexión hacia delante con una capa oculta.

Hornik et al. (1989) demostraron que este tipo de red Perceptrón Multicapa (MLP) con una capa oculta es un elemento de uso universal. Por ello, puede ser utilizada para aproximar, cualquier función típica f , con exactitud aceptable a través de la siguiente expresión:

$$f(u) = \left(\sum_{j=1}^k v_j \tau \left(\sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot u_i - \theta_j \right) - \theta_l \right), \quad l=1, \dots, m \quad (1)$$

Donde: τ es la función de activación, k es el número de unidades ocultas, v_{jl} y w_{ij} representan los pesos, θ_i son los valores de polarización (sesgos) y u es el vector de los datos.

La función no lineal f fue estimada utilizando el método de optimización de Lavenberg-Marquardt que es un método estándar para minimizar el error cuadrado de la media, debido a sus propiedades de convergencia y robustez (Marquardt, 1963).

La iniciación del peso se realizó con el método de declive de Nguyen y Widrow (1990). Este método se usó en el sentido de forzar su magnitud hacia niveles más bajos mediante la adición de un término de regulación en la expresión del error cuadrado de la media (Príncipe et al., 2002). La normalización de los datos se realizó con las técnicas estándares.

La red neuronal de entrenamiento y rendimiento fue construida utilizando la siguiente función objetivo:

$$J = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2 \quad (2)$$

Donde: N es el número de muestras de datos consideradas, \hat{y} representa la verdadera salida de la red neuronal y e representa la salida estimada de la red neuronal.

El ochenta por ciento de cada conjunto de datos fue aleatoriamente utilizado para estimar el modelo y el 20% restante fue utilizado para validarlo. El entrenamiento se detuvo cuando la concordancia entre el rendimiento en la minimización del error del conjunto de entrenamiento y la calidad de la generalización obtenida del conjunto de aprobación fuera satisfactoria. En la prueba desarrollada, se verificó que 600 temporadas eran suficientes para esta aplicación.

Se construyeron cuatro modelos de predicción para cada género y variable dependiente (400 m FC y 200 m IM) incluyendo las variables con correlaciones significativas (entrada). También se tuvo en cuenta la eventualidad de obtener funciones redundantes debido al gran número de variables (Streiner y Normando, 2006), tomando precauciones para no integrar variables interrelacionadas.

RESULTADOS

Con respecto al análisis de validez interna de la evaluación técnica semicualitativa de natación, el 75% de las variables proporcionales que se estudiaron (96) presentó coeficientes de correlación (inter e intraobservador) de $r=1$ ($p=0,000$). En las otras variables (32) también se encontraron coeficientes de correlación elevados ($r=0,884$, $p=0,047$). En cuanto a las variables ordinales, los valores del Índice Kappa de Cohen siempre fueron iguales a 1, representando así una concordancia perfecta entre las evaluaciones absolutas que se realizaron.

Correlaciones Bivariadas

Las Tablas 2 y 3 se presentan las correlaciones bivariadas observadas en los varones y mujeres, respectivamente.

Dominio	Variables	Media (\pm DS)	r (Rendimiento 400m FC)	r (Rendimiento 200m IM)
Antropometría				
	Talla(cm)	172,20 (6,63)	($r = 0,305$ $p < 0,05$)	($r = 0,365$ $p < 0,05$)
	Índice envergadura/talla (cm)	1,06 (0,04)	($r = -0,335$ $p < 0,05$)	($r = -0,357$ $p < 0,05$)
	Diámetro profundo del pecho	20,81 (1,74)	-	($r = 0,553$ $p < 0,01$)
	Masa Magra (%)	84,2 (3,5)	($r = 0,315$ $p < 0,05$)	-
	Masa Grasa (%)	15,8 (3,5)	($r = 0,310$ $p < 0,05$)	-
F General (flexibilidad)				
	Flexión de tobillos ($^{\circ}$)	105,53 (51,98)	-	($r = -0,730$ $p < 0,01$)
	Extensión del tronco (cm)	29,74 (7,55)	-	($r = -0,553$ $p < 0,05$)
Funciones Específicas				
	Velocidad de nado en el LT (4 mmol.L ⁻¹) (m.s ⁻¹)	1,40 (0,08)	($r = 0,756$ $p < 0,01$)	($r = 0,656$ $p < 0,01$)
	Deslizamiento (cm)	6,67 (0,73)	($r = 0,807$ $p < 0,01$)	-
Eficiencia Técnica				
	Técnica Estilo Libre – salida de brazos (%)	84,9 (36,4)	($r = 0,461$ $p < 0,05$)	($r = -0,465$ $p < 0,05$)
	Técnica de la brazada de pecho – barrido de piernas hacia abajo (%)	47,0 (35,2)	-	($r = -0,546$ $p < 0,01$)

Tabla 2. Datos correspondientes a la media y desvío estándar (DS) de las variables que se correlacionaron con el rendimiento en los 200 m IM o en los 400 m libres en nadadores de sexo masculino. En la tabla también se presentan los coeficientes de correlación (r).

Dominio	Variables	Media (±SD)	r (rendimiento 400m FC)	r (rendimiento 200m IM)
Antropometría				
	Talla(cm)	158,86 (4,93)	-	(r = 0,315 p<0,05)
	Largo de las Piernas (cm)	86,76 (9,41)	(r = -0,304 p<0,05)	(r = -0,356 p<0,01)
	Largo de los Pies (cm)	23,79 (1,11)	-	(r = 0,336 p<0,01)
	Diámetro profundo del pecho	18,11 (1,58)	-	(r = 0,715 p< 0,01)
Funciones Generales (fuerza)				
	Fuerza de Puño (N)	25,79 (3,93)	-	(r = 0,699 p<0,01)
Funciones Específicas				
	Velocidad de nado en el LT (4 mmol.L ⁻¹) (m.s ⁻¹)	1,28 (0,07)	(r = 0,832 p<0,01)	(r = 0,764. p<0,01)
	Acumulación Máxima de Lactato (mmol.L ⁻¹)	6,53 (1,21)	-	(r = 0,588 p<0,01)
Eficiencia Técnica				
	Técnica de Pecho –piernas (%)	89,1 (21,9)	-	(r = 0,588 p<0,01)
	Técnica Estilo Libre-Global (%)	60,0 (16,3) -	-	(r = 0,414 p<0,05)
	Técnica Estilo Libre/Global (%)	45,8 (21,0)	-	(r = 0,399 p<0,05)
	Técnica Estilo Libre/ barrido hacia abajo (%)	35,2 (30,4)	(r = 0,510 p<0,05)	(r = 0,435 p<0,05)
	Técnica Estilo Libre /salida (%)	78,1 (42,0)	(r = 0,400 p<0,05)	-

Tabla 3. Datos correspondientes a la media y desvío standard (DS) de las variables que se correlacionaron con el rendimiento en los 200 m IM o en los 400 m de crol en nadadores de sexo femenino. En la tabla también se presentan los coeficientes de correlación (r).

Modelos de Red Neuronal

En ésta aplicación sólo fueron incluidas las variables independientes que estaban significativamente asociadas con el rendimiento (400 m FC y 200 m IM). En la Tabla 4, se presentan las diferencias entre los verdaderos valores del rendimiento (IPS, swim news, Canadá) y los valores estimados mediante la aplicación de modelos de redes neuronales.

	200 m IM		400 m FC		Total	
	Varones	Mujeres	Varones	Mujeres	Varones	Mujeres
Puntuaciones (IPS)	5,7 (49,2)	-3,0 (42,8)	4,8 (26,8)	3,3 (49,1)	4,5 (39,6)	0,2 (46,0)
%	1,7 (13,3)	-0,2 (6,9)	0,6 (4,3)	0,7 (7,8)	1,2 (9,8)	0,2 (7,3)

Tabla 4. Media de las diferencias entre los valores de rendimiento medidos y estimados para cada una de las pruebas realizadas, obtenidos con la aplicación de los modelos de redes neuronales. Los datos se expresan como Media (±DS).

Modelado del rendimiento en los 400 m FC

El diseño del modelo de rendimiento en la prueba de 400 m de FC en los nadadores de sexo masculino involucró la integración de la talla, índice envergadura/talla, masa magra, masa grasa, velocidad de nado en el umbral del lactato, deslizamiento y eficiencia técnica en la fase de salida de brazos en FC. En las nadadoras, el modelado de los eventos de 400 m FC involucró la integración del largo de las piernas, velocidad de nado en el umbral del lactato, eficiencia técnica en FC (brazos/global), eficiencia técnica en la fase de barrido de brazos hacia abajo y fase de salida de brazos en FC.

En los varones el modelo estimado predijo una puntuación promedio de 675,2±52,4 (4 min 30,60 s ± 11,70 s), mientras la verdadera puntuación media fue de 680±54,0 (4 min 29,56 s ± 24,12 s). Se observó una diferencia promedio de 4,8 ± 26,8 puntos, lo que representa un error de estimación en la predicción de aproximadamente 0,6 ± 4,3%. En las nadadoras el modelo predijo una puntuación media de 649,0 ± 66,0 (5min 3,55 s ± 15,66 s), mientras que el promedio real fue de 652,3 ± 72,8 (5min 2,95 s ± 35,37 s). Se observó una diferencia media de 3,3 ± 49,1 puntos lo que representa un error de

estimación en la predicción de aproximadamente $0,7 \pm 7,8\%$.

Modelado del Rendimiento en 200 m IM

El diseño del modelo de rendimiento de las pruebas de 200 m IM en los nadadores de sexo masculino involucró la integración de la talla, índice envergadura/talla, diámetro profundo del pecho, flexión de tobillos, extensión del tronco, velocidad de nado en el umbral del lactato, eficiencia técnica en el estilo pecho (barrido de piernas hacia abajo) y en FC (salida de brazos). En las nadadoras, el diseño del modelo en esta prueba involucró la integración de la talla, longitud de piernas, longitud de pies, diámetro profundo del pecho, fuerza de puño, velocidad de nado en el umbral del lactato, acumulación máxima de lactato, eficiencia técnica en el estilo espalda (piernas), FC (global), FC (global de los brazos), FC (salida de brazos).

El modelo estimado en los varones predijo una puntuación media de $652,7 \pm 72,7$ (2min 25,03 s \pm 16,15 s), mientras que la verdadera puntuación fue de $658,4 \pm 59,9$ (2min 24,45 s \pm 12,21 s). La diferencia promedio observada fue de $5,7 \pm 49,2$ puntos, lo que representa una variación promedio entre el rendimiento real y el estimado de sólo $1,7 \pm 13,3\%$.

En el caso de las nadadoras el resultado del modelo establecido arrojó una puntuación media de $615,8 \pm 76,4$ (2min 45,75 s \pm 20,56 s), mientras que el promedio real fue de $612,8 \pm 74,9$ (2 min 46,09 s \pm 19,92 s). El valor de la diferencia entre el rendimiento real y el estimado fue de $-3,0 \pm 42,8$ puntos lo que representa un error en la estimación de la predicción de aproximadamente $-0,2 \pm 6,9\%$.

DISCUSION

Correlaciones Bivariadas

Numerosos autores (Lees, 2002; Linder et al., 2003; Geladas et al., 2005; Perl, 2004) han intentando aislar, a partir de una amplia gama de variables, aquéllas que tienen mayor incidencia sobre el éxito en la competencia. Sin embargo, a pesar de la series de valoración y de los tipos de análisis, todavía no se ha logrado estimar el rendimiento con precisión (Geladas et al., 2005).

En los nadadores de sexo masculino, la talla se correlacionó positivamente con el rendimiento en ambas pruebas, lo que coincide con resultados anteriores (Lees, 2002; Linder et al., 2003; Mazza et al., 1993). En el presente estudio, algunas variables relacionadas a la composición corporal (masa magra y masa grasa) se correlacionaron con el rendimiento en los 400 metros de FC. El diámetro profundo del pecho también presentó correlación con el rendimiento en la prueba de 200 metros IM.

En el caso de las nadadoras, se observó una correlación entre el rendimiento en la prueba de 200 metros IM y el diámetro profundo del pecho, longitud de los pies y la talla, lo que confirma los resultados obtenidos previamente por Kubiak-Janczaruk (2005).

Según nuestros resultados, la fuerza no parecía determinar el rendimiento en nadadores del mismo grupo etario, al menos en los parámetros generales que fueron evaluados. Nuestros resultados mostraron solamente una sola asociación significativa entre las mediciones de fuerza y rendimiento. Esta falta de asociaciones significativas no coincide con lo observado en estudios anteriores realizados con nadadores (Smith et al., 2002). La falta de asociación entre la fuerza y el rendimiento de nado puede deberse: a) al hecho de que la asociación entre la fuerza y el rendimiento se hace más evidente en velocidades de nado más altas, especialmente en las pruebas de menor duración que las que nosotros utilizamos (Christensen y Smith, 1987; Costill et al., 1980; 1983; Geladas et al., 2005; Hawley et al., 1992; Klentrou y Montpetit, 1991; Roberts et al., 1991; Toussaint y Vervoorn, 1990); b) al hecho que hay poca transferencia de la fuerza en superficies secas hacia la natación, especialmente cuando la carga y la velocidad de movimiento se mantienen constantes (Olbrecht et al., 1985; Sharp et al., 1982).

Watanabe y Takai (2005) trataron de analizar los factores que contribuyen al rendimiento en natación y de determinar hasta que punto estos factores cambian en relación al desarrollo de los nadadores en los grupos etarios. Sus resultados sugieren que la fuerza muscular no contribuye fuertemente con el rendimiento de la natación en sujetos menores de 14 años. Contrariamente, ellos concluyeron que la fuerza muscular era un importante factor que determinaba el rendimiento de nado en nadadores de ambos géneros mayores de 15 años de edad en pruebas de 50 m de estilo libre.

Nosotros encontramos algunas correlaciones significativas entre el rendimiento en 200 m de IM y mediciones de flexibilidad en los varones, tales como la flexión plantar de los pies y la extensión del tronco. Aunque los valores de la

asociación eran débiles, estos resultados concuerdan con los datos publicados en la literatura. El estudio de Saavedra (2002) presenta una correlación significativa con la flexión del tronco ($r = 0,294$, $p < 0,05$). Rama y Alves (2004) confirmaron esta asociación ($r = 0,207$, $p < 0,19$) y además encontraron una asociación con la flexión de hombros ($r = 0,272$, $p < 0,37$). En el caso de las nadadoras, la ausencia de asociaciones significativas concuerda con los resultados de los estudios mencionados previamente. Por otro lado, en el estudio de Geladas et al., (2005) se observaron asociaciones significativas entre la flexibilidad de los hombros y el rendimiento en pruebas de 100 m FC en ambos géneros. Sin embargo, el grado de asociación era considerablemente más bajo en las mujeres que en los hombres.

La magnitud de las correlaciones entre la velocidad de nado en el umbral del lactato (LT) y las dos variables de rendimiento corroboran los resultados obtenidos en otros estudios (Kubiak-Janczaruk, 2005; Smith et al., 2002). Sin embargo, dichos estudios no utilizaron la misma metodología que utilizamos en el presente el estudio, para evaluar el rendimiento.

La acumulación máxima de lactato podría indicar liberación de energía anaeróbica y esta variable muy pocas veces se asocia con el rendimiento en distancias de nado cortas (Bonifazi et al., 1993).

Nuestras observaciones son consistentes con esta afirmación en las nadadoras, ya que en nuestro estudio encontramos que dicha variable estaba asociada con el rendimiento en pruebas de 200 m, pero no con las de 400 m. Sin embargo, en los varones, no se observó ninguna asociación entre la acumulación máxima de lactato y el rendimiento. Si bien hay un desarrollo temprano de potencia anaeróbica en las nadadoras, el hecho de que no se observara asociación en los varones no puede ser explicado por tal fenómeno, ya que los varones eran dos años mayores que las mujeres. En nuestra muestra, la acumulación máxima de lactato no parece ser un parámetro determinante en el rendimiento en pruebas de 200 m IM en varones.

Respecto a la capacidad de los varones de deslizarse hidrodinámicamente, observamos una asociación significativa con la prueba de 400 m FC, lo que coincide con los resultados obtenidos por Rama y Alves, 2004 ($r = 0,372$, $p < 0,01$) y por Saavedra, 2002 ($r = 0,528$, $p < 0,01$). En las mujeres no observamos asociaciones significativas, confirmando así los resultados presentados por Rama y Alves, 2004 ($r = 0,425$, $p < 0,01$).

En nuestra muestra, la flotación no mostró correlación con el rendimiento (en ambos géneros), coincidiendo con los resultados de Rama y Alves, 2004. Por su parte Saavedra (2002) encontró una asociación significativa entre la flotación vertical y el rendimiento de nado en mujeres ($r = -0.357$, $p < 0.01$).

Esta discordancia podría deberse a las diferencias en la composición corporal entre los sujetos de los diferentes estudios (Dobein y Holmer, 1974).

En nuestro estudio, las asociaciones entre los parámetros técnicos semicualitativos y el rendimiento se limitan a unas pocas correlaciones significativas observadas en nadadoras en estilo libre. Estos resultados coinciden con los resultados de Saavedra, (2002), quien sugirió que las habilidades técnicas no son relevantes para el rendimiento en estas edades.

Modelos de Redes Neuronales

El análisis no-lineal resultante del uso de la red neuronal con conexión hacia adelante (*feedforward*) permitió el desarrollo de cuatro modelos de predicción del rendimiento.

Las Figuras 2 y 3 ilustran las comparaciones entre los valores de rendimiento reales y los estimados (varones y mujeres) en 400 m FC y 200 m IM, respectivamente. El eje y representa las puntuaciones verdaderas y estimadas en las pruebas, representados como sistemas de puntos; en el eje x se colocaron cada uno de los casos analizados. Los cuadros blancos representan los valores estimados por la red neuronal y los círculos negros simbolizan el valor verdadero.

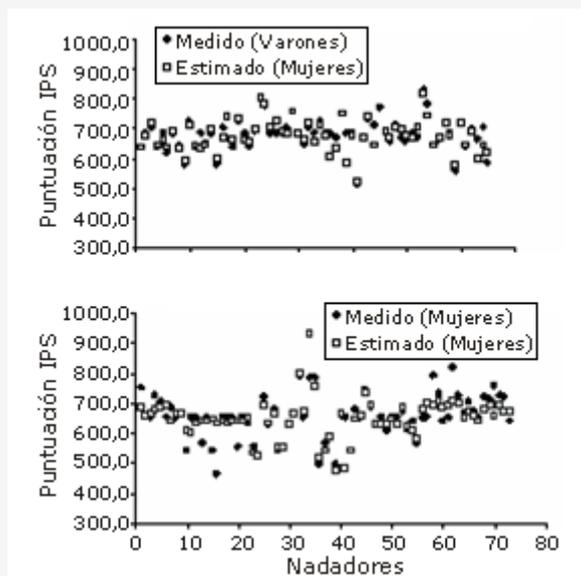


Figura 2. Valores de rendimiento reales y estimados por el modelo en la prueba de 400 m FC en nadadores varones (izquierda) y mujeres (derecha).

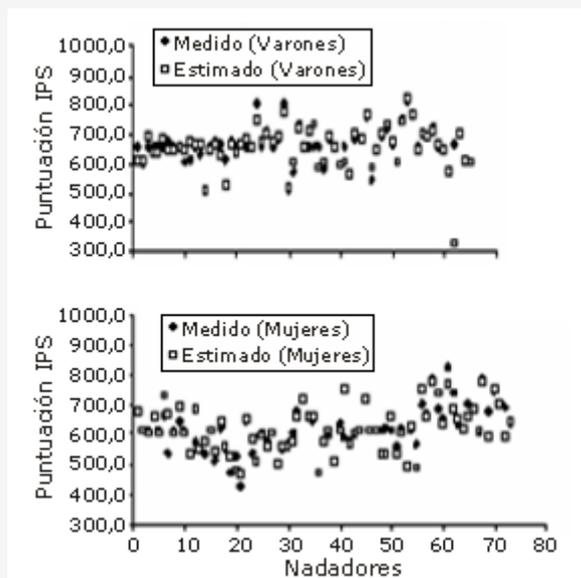


Figura 3. Valores de rendimiento reales y estimados por el modelo en la prueba de 200 m FC en nadadores varones (izquierda) y mujeres (derecha).

Como podemos observar en Tabla 4, la diferencia media entre los resultados verdaderos y los estimados obtenidos mediante cada uno de los cuatro modelos de red neural construidos fue pequeña. Esto concuerda con los resultados presentados por otros autores que utilizaron la misma metodología (Hahn, 2006; Lees, 2002; Liang y Liang, 2006; Linder et al., 2003). En el estudio de Hohmann et al. (2001), la red neuronal logró representar el rendimiento de nado en 19 competiciones con un error de estimación medio de 0,62 a 0,61 s. También fue posible predecir el tiempo de la semifinal en una competencia de 200 m de espalda en Sydney 2002, en base a los datos de dos fases de entrenamiento específicas previas con un error medio de $\pm 0,04$ s. En un estudio similar, Lees, (2002) aplicó el método de la red neuronal para predecir el rendimiento de nado en competición en base a algunos criterios de identificación de talentos.

Los resultados de rendimiento estimados fueron predichos en tres momentos diferentes: a los seis meses, 18 meses y 30 meses. Las desviaciones entre el rendimiento estimado y el tiempo verdadero fue aprox. 4,64 s en el primer momento de la

evaluación (seis meses), aprox. 3,16 s en el segundo momento de la evaluación (18 meses) y 3,03 s en el último momento de la evaluación (30 meses).

En los últimos años, se han aplicado con éxito conceptos y herramientas de la teoría de los sistemas dinámicos al estudio de los sistemas de movimiento, contradiciendo las posturas tradicionales que consideran la variabilidad como ruido o error. En esta perspectiva, está claro que la variabilidad en los sistemas de movimiento esta siempre presente y es inevitable debido a las distintas necesidades que regulan el comportamiento de cada individuo (Davids et al., 2003). En nuestra opinión la herramienta de la red neuronal puede ser una metodología útil en la resolución de los problemas asociados al planteo de modelos del rendimiento. Los modelos estadísticos estándares como la regresión logística y el análisis multivariado asumen distribuciones bien definidas (por ejemplo distribución normal). Por otro lado, ellos también asumen la independencia entre todas las entradas y están limitados a relaciones lineales.

Sin embargo, estos requisitos raramente se cumplen en los sistemas de la vida real. Como alternativa a estos modelos pueden usarse las redes neuronales artificiales (Linder et al., 2003; Davids et al., 2003).

Por lo tanto, en este trabajo se intentó ilustrar las mejoras significativas del rendimiento de las redes neuronales y la robustez para las señales de predicción no lineales.

La aplicación de esta técnica también puede ser extendida al análisis del rendimiento en otros deportes. De hecho, Maier et al. (2000) intentaron modelar el patrón de movimiento en una prueba de lanzamiento de bala. Con este fin, los autores desarrollaron a un modelo de red neuronal capaz de predecir la distancia de vuelo máxima basada en los datos técnicos aplicados. El error de estimación entre la distancia de la bala estimada por el modelo y la verdadera distancia fue sólo 2,5%. Por otro lado, las tendencias para el estudio de la coordinación y el control han se han desplazado desde los modelos de movimiento simples hacia modelos que contemplan acciones complejas, que involucran muchas articulaciones en deportes tales como el cricket (Davids et al., 2005). El uso de tales modelos de movimiento ejemplifica la naturaleza de las complicaciones que interactúan y provocan la aparición de procesos de coordinación y control tal como lo proponen la teoría de los sistemas dinámicos y la psicología ecológica.

Conclusión

El uso de la tecnología de redes neuronales en las ciencias deportivas nos permitió crear modelos altamente realistas de predicción del rendimiento en natación basados en criterios previamente seleccionados que estaban relacionados con la variable dependiente (el rendimiento). La exactitud de los modelos de predicción que se desarrollaron concuerda con datos publicados previamente en la literatura. Por lo tanto, se considera que el uso de redes neuronales como herramienta puede ser una buena metodología para ser utilizada en la resolución de problemas complejos, tales como establecer un modelo de rendimiento o la identificación de talentos en una gran variedad de deportes y, específicamente, en la natación.

Puntos Clave

El análisis no lineal que surgió como resultado del uso de redes neuronales con conexión hacia delante, nos permitió desarrollar cuatro modelos de rendimiento.

Se observó una diferencia media baja entre los resultados verdaderos y los estimados, realizados por cada uno de los cuatro modelos de redes neuronales construidos.

La red neuronal como herramienta puede ser una buena metodología para establecer modelos del rendimiento, alternativa a los modelos estadísticos estándares que asumen que los datos poseen distribuciones bien definidas y que hay independencia entre todas las entradas.

El uso de redes neuronales en las ciencias deportivas nos permitió crear modelos muy realistas para la predicción del rendimiento en natación basados en criterios previamente seleccionados que estaban relacionados con la variable dependiente (el rendimiento).

REFERENCIAS

1. Aminian K., Robert P., Jequier E. and Schutz Y (1995). Incline, speed, and distance assessment during unconstrained walking. *Medicine and Science in Sports Exercise* 27, 226-234
2. Bartlett R (2006). Artificial intelligence in sports biomechanics: New dawn or false hope?. *Journal of Sports Science and Medicine*

- (online) 5, 474-479. Available from URL: <http://www.jssm.org>
3. Busso T., Denis C., Bonnefroy R., Geysant A. and Lacour J (1997). Modeling of adaptations to the physical training by using a recursive least squares algorithm. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology* 82, 1685- 1693
 4. Bonifazi M., Martelli G., Marugo L., Sardella F. and Carli G (1993). Blood lactate accumulation in top level swimmers following competition. *Journal of Sports Medicine Physical Fitness* 33, 13-18
 5. Christensen C. and Smith G (1987). Relationship of maximum sprint speed and maximal stroking force in swimming. *Journal of Swimming Research* 3(2), 18-20
 6. Carzola G (1993). Specific tests to the swimmer evaluation. Cestas, Association pour la recherche et l'évaluation en activité physique et en sport. *Editions Vigot, Paris. (In French)*
 7. Chollet D (1990). Scientific approach of the sportive swimming. *Editions Vigot, Paris. (In French)*
 8. Costill D., Sharp R. and Troup J (1980). Muscle strength: Contributions to sprint swimming. *Swimming World* 21, 29-34
 9. Costill D., King D., Holdren A. and Hargreaves M (1983). Sprint speed vs. swimming power. *Swimming Technique* 20-22
 10. Costill D., Maglischo E. and Richardson A (1992). Swimming. *Hand-book of Sports Medicine and Science. Blackwell Scientific Publications, Oxford*
 11. Davids K., Araujo D., Glazier P. and Bartlett R. M (2003). Movement systems as dynamical systems: the role of functional variability and its implications for sports medicine. *Sports Medicine* 33, 245-260
 12. Davids K., Renshaw I. and Glazier P (2005). Movement models from sports reveal fundamental insights into coordination processes. *Exercise and Sport Science Reviews* 33, 36-42
 13. Dobein W. and Holmer I (1974). Body composition, sinking force and oxygen uptake in competitive swimming style. *European Journal of Applied Physiology* 33, 105-118
 14. Geladas N. D., Nassis G. P. and Pavlicevic S (2005). Somatic and physical traits affecting sprint swimming performance in young swimmers. *International Journal of Sports Medicine* 26(2), 139- 144
 15. Hahn M. E (2006). Feasibility of estimating isokinetic knee torque using a neural network model. *Journal of Biomechanics, in press*
 16. Hawley J. A., Williams M. M., Vickovic M. M. and Handcock P. J (1992). Muscle power predicts freestyle swimming performance. *British Journal of Sports Medicine* 26, 151-155
 17. Heath B. H. and Carter J. E (1966). A comparison of somatotype methods. *American Journal of Physical Anthropology* 24, 87-99
 18. Heath B.H. and Carter J. E (1967). A modified somatotype method. *American Journal of Physical Anthropology* 27(1), 57-74
 19. Herren R, Sparti A, Aminian K and Schutz Y (1999). The prediction of speed and incline in outdoor running in humans using accelerometry. *Medicine and Science in Sports Exercise* 31, 1053- 1059
 20. Hohmann A., Edelmann-Nusses J. and Hennerberg B (2001). Modeling and prognosis of competitive performance in elite swimming. *XIX International Symposium on Biomechanics in Sports, June 20-27, San Francisco, USA. Proceedings.* 54-57
 21. Hornik K., Stinchcombe M. and White H (1989). Multi-layer feed forward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2, 359-366
 22. Klentrou P. P. and Montpetit R. R (1991). Physiological and physical correlates of swimming performance. *Journal of Swimming Research* 7(1), 13-18
 23. Kubiak-Janczaruk E (2005). Spirometric evaluation of the respiratory system in adolescent swimmers. *Annales Academiae Medicae Stetinensis* 51(2), 105-113
 24. Kurz M. J. and Stergiou N (2005). An artificial neural network that utilizes hip joint actuations to control bifurcations and chaos in a passive dynamic bipedal walking model. *Biological Cybernetics* 93(3), 213-221
 25. Lees A (2002). Technique analysis in sports: a critical review. *Journal of Sports Science* 20, 813-828
 26. Linder R., Mohamed E. I., De Lorenzo A., and Poppl S. J (2003). The capabilities of artificial neural networks in body composition research. *Acta Diabetol* 40(Suppl 1), S9-14
 27. Liang Y. and Liang X (2006). Improving signal prediction performance of neural networks through multiresolution learning approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 36, 341- 352
 28. Mader A., Liesen H., Heck H., Phillipi H., Rust R., Scharch P. and Hullmann W (1976). Specific tests to evaluate physical condition in sports. *Sports Medicine and Art* 27, 80-112. (In German: English abstract)
 29. Maier K. D., Maier P., Wagner H. and Blickhan R (2000). Neural network modelling in sport biomechanics based on the example of shot-put flight. *XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports, June 25-30, Hong Kong. Proceedings.* 26-29
 30. Maglischo E. W (2003). *Swimming fastest. Mayfield Publishing Company, California*
 31. Marquardt D (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 11, 164-168
 32. Mazza J., Ackland T., Bach T. and Cosolito P (1993). Absolute body size. In: Kinantropometry in aquatic sports: A study of world class athletes. *Eds: Carter, L. and Ackland, T. Champaign, Illinois: Human Kinetics Books.* 15-54
 33. Nguyen D. and Widrow B (1990). Improving the learning speed of a 2- layer neural network by choosing initial values of the adaptive weights. *International Joint Conference on Neural Networks, June 17-21, San Diego, USA. Proceedings III.* 2063-2068
 34. Olbrecht J., Madsen O., Mader A., Liesen H. and Hollmann W (1985). Relationship between swimming velocity and lactic concentration during continuous and intermittent training exercises. *International Journal of Sports Medicine* 6(2), 74-77
 35. Perl J (2004). A neural network approach to movement pattern analysis. *Human Movement Science* 23, 605-620
 36. Principe J., Euliano N. and Garani S (2002). Principles and networks for self-organization in space-time. *Neural Network* 15, 1069-1083
 37. Rama L. and Alves F (2004). Determinant factors of the youth Portuguese swimmers. 27th Scientific Congress of the Portuguese Swimming Coaches Association. *May 1-2, Lisbon, Portugal. Book of Abstracts.* 24-26. (In Portuguese: English abstract)
 38. Reischle K (1993). Biomechanics of swimming. *Editorial Gymnos, Madrid. (In Spanish)*
 39. Roberts A. J., Termin B., Reilly M. F. and Pendergast D. R (1991). Effectiveness of biokinetic training on swimming performance in

- collegiate swimmers. *Journal of Swimming Research* 7(3), 5-11
40. Ross W. D. and Marfell-Jones M. J (1991). Kinanthropometry. In: Physiological testing of the high-performance athlete. Eds: MacDougall, D., Wenger, H. and Green, H. Champaign, Illinois: Human Kinetics Books. 22-29
 41. Saavedra J. M (2002). Multidimensional measurements and performance in youth swimmers of national level. *Doctoral thesis, University of Coruña, Coruña. 1-134. (In Spanish: English abstract)*
 42. Sharp R., Troup J., and Costill D (1982). Relationship between power and sprint freestyle swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 14, 53-56
 43. Shestakov M. P (2000). Artificial intelligence in sport science of the 21st century. *Theory and Practice of Physical Education* 7, 8-14 (In Russian: English abstract)
 44. Shestakov M. P (2005). Modeling of technical training of discus throwers in the period of significant changes of their mass-inertia characteristics. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science* 24, 367-370
 45. Smith D. J., Norris S. R. and Hogg J. M (2002). Performance evaluation of swimmers: scientific tools. *Sports Medicine* 32, 539-554
 46. Streiner D. L. and Norman G. R (2006). Precision and accuracy: Two terms that are neither. *Journal of Clinical Epidemiology* 59, 327-330
 47. Toussaint H. and Vervoorn K (1990). Effects of specific high resistance training in the water on competitive swimmers. *International Journal of Sports Medicine* 11, 228-233
 48. Vilas-Boas J. P., Cunha P., Figueiras T., Ferreira M. and Duarte J. A (1996). Movement analysis in simultaneous swimming techniques. In: Symposium of Sportive Swimming. Eds: Wilke, K., Daniel, K., Hoffmann, U. and Klauck, J. Bochenem: Sport Fahnenmann Verlag. 95-103
 49. Watanabe M. and Takai S (2005). Age-related change of the factors affecting swimming performance in junior swimmers. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine* 54, 353-361
 50. Wu Q. and Swain R (2002). A mathematical model of the stability control of human thorax and pelvis movements during walking. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 5, 67-74

Cita Original

António José Silva, Aldo Manuel Costa, Paulo Moura Oliveira, Victor Machado Reis, José Saavedra, Jurgen Perl , Abel Rouboa y Daniel Almeida Marinho The Use Of Neural Network Technology To Model Swimming Performance. *Journal of Sports Science and Medicine*; 6, 117-125, 2007.