

Modelación del nivel de ácido láctico para atletas de alto rendimiento

M. A. Leminszka*
G. Dieck-Assad*
S. O. Martínez*
J. E. Garza**

* Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computacional.

** Departamento de Educación Física Medicina del Deporte.
Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey.

Correspondencia:
G. Dieck-Assad
Ave. E. Garza Sada 2501 Sur, Monterrey, N.L. México.
E-mail: graciano.dieck.assad@itesm.mx

Artículo recibido: 15/noviembre/2009
Artículo aceptado: 25/marzo/2010

RESUMEN

El presente trabajo propone un modelo para la medición de ácido láctico de manera no invasiva. El modelo puede usarse de manera efectiva para medir ácido láctico en atletas de alto rendimiento. Se presentan diversos modelos que tratan de resolver el problema haciendo una correlación de variables físicas medibles. Los resultados indican que los modelos predicen en forma efectiva la cantidad de lactato en las pruebas físicas aplicadas a tres atletas. En las pruebas de campo presentadas el modelo ideal ponderado presenta la mejor exactitud en general. Al comparar los resultados de los modelos con mediciones de muestras de sangre en un analizador electrónico, el modelo ideal mejorado obtiene una eficiencia (exactitud) máxima del 94.71% y el Modelo Ideal básico obtiene una eficiencia mínima de 90.61%. Todos los modelos generan un margen de error alrededor del 5%. Las eficiencias son un indicativo de qué tan cerca está el modelo con respecto a la medición de un analizador electrónico de muestras de sangre.

Palabras clave: Ácido láctico, metodología de modelación, modelo experimental, analizador de muestras de sangre.

ABSTRACT

The following article proposes a model to perform a non-invasive measurement of lactic acid. The model could be used effectively to measure lactic acid in high performance athletes. Several models are presented that intend to correlate measurable physical variables. The results indicate that the models predict effectively lactate quantities during physical tests applied to athletes. The best overall accuracy is provided by the ponderated-ideal-model. Comparing the results with blood test measurements from an electronic analyzer, the improved-ideal-model obtains a maximum efficiency (accuracy) of 94.71%, while the basic-ideal-model obtains a minimum efficiency of 90.61%. Both models generate an error margin of around 5%. The efficiencies are indicative of how close the model can be to measurements performed by an electronic blood sample analyzer device.

Key words: Lactic acid, modelling methodology, experimental model, blood sample analyzer.

INTRODUCCIÓN

En el entrenamiento deportivo de atletas de alto rendimiento es de mucho interés conocer el estado del ácido láctico al entrenar, pues es el mejor indicador de esfuerzo físico que puede determinar la dosificación de carga o intensidad de trabajo. En los últimos 10 años sólo se tiene conocimiento de dos dispositivos en materia de ácido láctico de los cuales uno figura como solicitud de patente u otro como patente. La solicitud de patente US 2005/0164832 A1¹ identifica el punto de deflexión o punto de balance de ácido láctico (LBP) que es el momento donde el esfuerzo aeróbico cambia a un estado anaeróbico y empieza a dispararse la producción de lactato. Sin embargo, esta invención requiere de una caminadora y no puede ser usada al aire libre. La patente US5757002 hace una medición con luz infrarroja variando longitudes de onda²; sin embargo, su calibración es muy compleja y requiere de una computadora para hacer un análisis de regresión en los datos.

Este trabajo incorpora varios modelos matemáticos para poder predecir el nivel de ácido láctico en la sangre que tiene una persona en todo momento, centrándose especialmente en la producción anaeróbica. Se pretende concretar algunos modelos para incorporarlos en un sistema de instrumentación electrónica que permita desplegar la información, preferentemente en forma de un reloj de pulsera. Los modelos propuestos son el resultado de una profunda investigación de las causas que generan la elevación del ácido láctico en humanos. El enfoque es totalmente deportivo centrándose en pruebas de atletismo y eventualmente ciclismo. Se realizó una descripción de la bioquímica involucrada³ y luego se procedió a desarrollar los modelos. Se han incorporado los factores que contribuyen en la producción de lactato, empezando con un modelo ideal muy sencillo y después modificándolo para incrementar su fidelidad. El trabajo desarrollado³ culmina con un modelo dinámico cuyas ecuaciones requieren del uso de transformadas de Laplace. Sin embargo, el modelo dinámico no se describe en este artículo. Este trabajo hace referencia a los últimos avances científicos en la materia y desarrolla tres variantes del modelo ideal para predicción de lactato³.

Se ha demostrado ampliamente que un entrenamiento en base a muestras de lactato lleva a los atletas a mejorar notablemente sus rendimientos como lo publica *Janssen* en su obra *Lactate Pulse-Rate*⁴. Si un entrenador pudiera conocer el

nivel de ácido láctico de sus atletas a la hora de hacer ejercicio, podría entrenarlos de manera más eficiente y sus resultados se traducirían en mejores rendimientos físicos. Un beneficio adicional es facilitar la identificación de talentos para el deporte. Una persona mal entrenada pero apta para el deporte genera grandes cantidades de lactato.

Actualmente no existen modelos ni dispositivos no invasivos de medición o predicción de ácido láctico. Los medidores convencionales requieren que el atleta se detenga en su entrenamiento para realizar una medición de lactato, lo cual requiere extraer sangre, algo que resulta incómodo y doloroso. El problema es definir una forma de medir o predecir el nivel de lactato de manera no invasiva correlacionando diversos parámetros físicos para encontrar la concentración de ácido láctico en la sangre esperando obtener un resultado de por lo menos 80% de efectividad comparado con los resultados de los medidores convencionales invasivos. Los médicos y entrenadores sugieren que una medición no invasiva de utilidad, debe de hacerse con estos índices de efectividad. La eficiencia se define en términos de qué tan cerca se estaría de una medición confiable y de utilidad para la medicina deportiva y para los entrenadores que dosifican el ejercicio.

El objetivo de este trabajo es encontrar una forma apropiada de correlacionar diversos parámetros físicos medibles en forma no invasiva para determinar el ácido láctico, es decir de manera más formal, sintetizar un modelo. La contribución científica en el mundo del deporte propone a los atletas de alto rendimiento una mejora de su desempeño al poder conocer el nivel de ácido láctico en su sangre al hacer ejercicio.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo medidos diversos parámetros físicos, es posible llegar a una buena aproximación del valor real de lactato en la sangre haciendo una correlación entre ellos. De acuerdo a la literatura del deporte y la información presentada en la solicitud de patente US 2005/0164832 A1¹, que es una invención para identificar el punto de balance del ácido láctico (LBP), a medida que se aumenta la intensidad del ejercicio existe un comportamiento lineal entre el pulso (frecuencia cardiaca) y la velocidad hasta que se llega al punto de deflexión o punto de balance del ácido láctico LBP. En este punto se pierde la relación lineal entre ambas curvas. La idea es usar la curva velocidad

vs frecuencia cardiaca posterior al punto de deflexión aunada a otros parámetros para hacer una correlación y calcular el nivel de lactato. Cabe mencionar que la patente en cuestión sólo indica el punto de deflexión, pero no da ninguna técnica para medición de lactato.

Las contribuciones más importantes que fueron consultadas son: la solicitud de patente¹ que ilustra parte del conocimiento sobre la disparidad de crecimiento de velocidad y pulso después del llamado umbral; la tesis de Lemiszka³ que ilustra un estudio completo del fenómeno de producción de lactato al igual que la modelación estática y dinámica de este comportamiento en atletas de alto rendimiento; el libro de Peter Janssen⁴, que aporta todo el conocimiento en materia del punto de deflexión, de las pruebas existentes para localizarlo y de todos los factores externos que pueden influir en la alteración de los niveles de lactato; y la publicación de Zhou et al.⁵ en un journal de fisiología, que aporta la forma de la curva de producción y acumulación de lactato, así como la forma en que se consume el glucógeno, recurso principal para la generación de lactato en la sangre. Finalmente, el proceso bioquímico se consultó y estudió usando la detallada explicación de Trudy, McKee y James R. McKee⁶. Otras referencias consultadas para el estudio de la *gluconeogénesis* son Vázquez-Contreras⁷ y Marco⁸.

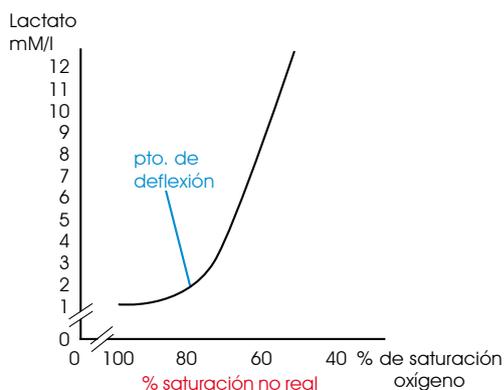
La metodología seguida para la modelación empieza con un modelo sencillo para predecir el valor de la concentración de lactato. El primer modelo propuesto es bastante sencillo al basarse en la diferencia de dos curvas en una prueba denominada prueba de Conconi. A continuación se extiende el modelo base involucrando una función de metabolización característica de cada persona en particular. Como tercera fase de modelación, se consideran todos los factores externos que pueden influir en la predicción final del nivel, tales como calor, humedad, altitud, horario y variación de condición física. La cuarta variante del modelo expone uno de los últimos avances en el estudio, y análisis de la producción de lactato. Finalmente, se realiza una validación de los modelos y se muestran los resultados iniciales de la experimentación realizada al comparar las predicciones de los modelos propuestos con el valor arrojado por un analizador de lactato electrónico de muestras de sangre. El presente desarrollo describe una plataforma inicial con modelos alternativos y que actualmente se verifican usando métodos estadísticos en grupos de atletas de alto rendimiento.

MODELO IDEAL DE LA FISIOLOGÍA DE LACTATO

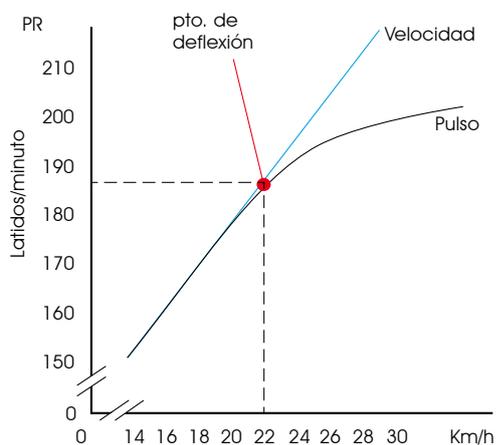
En la glucólisis, como producto de desecho siempre hay generación de ácido láctico, sin embargo, como ya se abordó, cuando hay buena capacidad en el ciclo de Krebs propiciando óptimas condiciones de oxígeno y utilización de este recurso, el desecho resultante que más abunda de la glucólisis es el Acetil-CoA. Cuando no hay suficiencia o utilización de oxígeno, el desecho generado es el ácido láctico. Nótese que éste es el único desecho generado al procesar glucógeno muscular, o dicho en otras palabras, el ácido láctico es el único desecho cuando de músculos se trata. Con esta información, es natural pensar que en una disminución gradual de la capacidad del uso de oxígeno y acabarse la suficiencia de éste para metabolizar el piruvato³, la cantidad de ácido láctico se empieza a incrementar. Este momento es un punto de deflexión si se ve gráficamente. La Figura 1(a) muestra un decremento gradual de oxígeno. Obsérvese cómo al disminuir la cantidad de oxígeno necesaria para generar la energía demandada aeróbicamente, hay un momento donde la producción de ácido láctico se dispara. Este es el punto de deflexión o umbral aeróbico-anaeróbico. En la Figura PR se refiere al pulso del atleta o razón de pulso (del inglés «*Pulse Rate*») y tiene unidades de latidos por minuto.

Es necesario recordar que la generación de ácido láctico corresponde a una demanda de generación de energía o ATP (nucleótido adenosina trifosfato). El problema consiste en encontrar ese punto de deflexión a partir de variables o parámetros no invasivos en un atleta. La cantidad de oxígeno es reflejo de los latidos del corazón. La velocidad es reflejo de la energía generada/exigida. Cuando el corazón no puede latir a una tasa exigida para crear ATP (energía), se observa una insuficiencia de oxígeno y generación de ácido láctico. Con esta información se puede empezar a construir un modelo. Gráficamente esta analogía se observa en la Figura 1(b) donde el atleta corre incrementando su velocidad constantemente, llega un momento en que su corazón ya no puede latir más rápido (sin embargo su velocidad sigue aumentando). En este momento se ha llegado al umbral, su corazón ya no puede abastecer la demanda de oxígeno y el ácido láctico generado se dispara.

Existe un concepto llamado umbral anaeróbico que se define como la máxima intensidad de ejercicio que puede ser mantenida por un largo periodo de tiempo, que coincide con un porcen-



(a) Punto de deflexión o umbral.



(b) Punto de deflexión a partir de variables medibles en forma no invasiva en un atleta.

Figura 1. Punto de deflexión o umbral y en función de variables medibles.

taje de VO_{2Max} (máxima absorción de oxígeno en la sangre). Cuando este porcentaje es sobrepasado, se produce la acumulación de ácido láctico. El grado de acidez impide mantener la intensidad por mucho tiempo^{3,4}. Se ha observado una relación constante entre el umbral anaeróbico y el punto de deflexión, v_d (velocidad de deflexión), no sólo en atletismo sino también en canotaje, ciclismo, patinaje, esquí de ruta y otros deportes^{3,4}. Para poder realizar la predicción con algún modelo, se necesita conocer un dato crucial que es el punto de deflexión. Teniendo este dato se puede dividir la predicción en dos casos de análisis, antes del umbral y después del umbral. La razón de hacer la división es que en el momento aeróbico se ha demostrado que la cantidad de lactato se puede predecir a partir de una sola variable: el pulso^{3,4}. Cuando el organismo entra a un estado anaerobio el número de variables es mucho mayor. Se em-

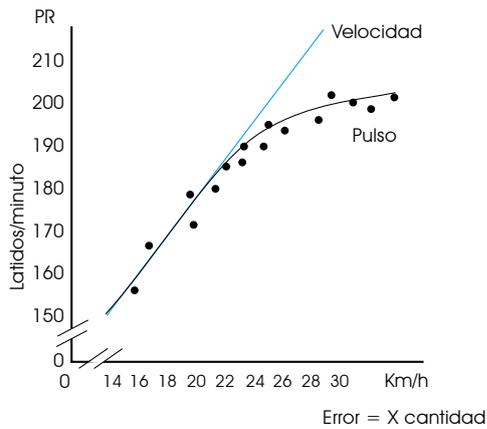
pieza con un modelo ideal que considera pocas variables. Con el propósito de establecer este punto de división aeróbico-anaeróbico, a continuación se sigue un procedimiento para la determinación del punto de deflexión.

El primer paso consiste en hacer la prueba de Conconi^{3,4}, en donde se hará subir la velocidad del atleta cada 200 m y los niveles de lactato y pulso son registrados. Una vez teniendo todos los registros, se construye la gráfica de pulso vs velocidad como la ilustrada en la Figura 2(a). Una vez teniendo esta gráfica se procede a la determinación del punto de deflexión usando uno de los métodos que se presentarán a continuación. La línea curvada de las Figuras 2(a) y 2(b) es la correlación de los puntos medidos de pulso. También se podrían realizar mediciones de consumo de oxígeno o pulso cardiaco en línea y a través de un dispositivo inalámbrico registrar los puntos de la curva para determinar el punto de deflexión.

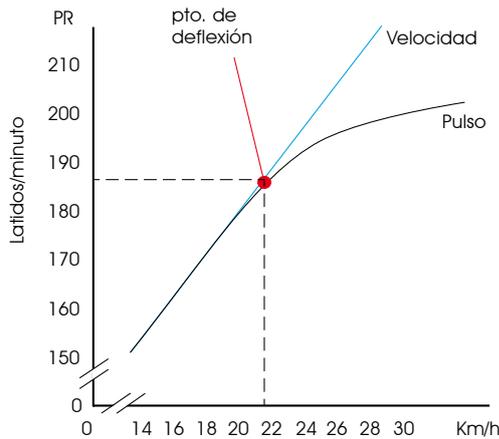
Determinación del umbral a partir de la gráfica de pulso. Este método consiste en obtener el punto de deflexión a partir de sobreponer la curva de pulso en la de velocidad. La curva de velocidad puede ser generada fácilmente, pues es una línea recta cuando su incremento es constante. En el momento donde dejan de coincidir las curvas es el punto de deflexión. Existe información que indica que el punto de deflexión para el pulso en unidad de latidos por minuto es de 210 menos la edad de la persona³ (algunos médicos y científicos manejan el número de 220). La Figura 2(b) muestra este método donde el punto se localiza en 185 latidos por minuto y 22 km/h de velocidad.

Existe un método de cálculo de incrementos para estimar el punto de deflexión. Este método divide la gráfica en ciertos incrementos de Y (eje Y) y se calcula el ΔX (eje X) correspondiente al desplazamiento de la curva en esa dirección (X) hasta llegar al nuevo punto Y, partiendo del punto Y anterior. Esto se ilustra en la Figura 3. El punto de deflexión o umbral será cuando el cambio en X es mayor al cambio en X anterior, es decir, cuando $\Delta X > \Delta X_{anterior}$. Para este punto el valor de lactato debe andar alrededor de 4 [mMol/l].

Cabe mencionar que los incrementos encontrados de la variable velocidad, ΔX , no son constantes. Para determinar si hubo un incremento mayor que el anterior se puede establecer un máximo de incremento o tolerancia, ΔX_{TOL} , que si se pasa este valor, entonces ahí es donde se encuentra el punto de deflexión. Esto es, si $\Delta X > \Delta X_{TOL}$ entonces ahí está el punto de deflexión. El valor ΔX_{TOL} dependerá de



(a) Curva de pulso velocidad a partir de aproximaciones.



(b) Cálculo del punto de deflexión.

Figura 2. Curvas pulso vs velocidad para estimación de parámetros de deflexión.

la resolución o tamaño de los incrementos; o sea, entre más divisiones en la gráfica, la resolución será menor y ΔX_{TOL} será más pequeño. Al hacer observaciones en varios atletas del Tecnológico de Monterrey³ se encontró que el valor de ΔX_{TOL} debe ser aproximadamente igual a $1.5 \Delta X_{anterior}$.

A continuación se presenta una forma de estimar MLSS («Maximum Lactate Steady State») que es el paso o intensidad que corresponde a un aumento no significativo de lactato en un periodo prolongado de tiempo. Esto se obtiene a partir de cuatro variables para corredores de fondo¹⁰. Métodos alternativos obtienen el punto de deflexión para ciclismo y para otros deportes. Este modelo toma en cuenta las siguientes variables: pulso, número de respiraciones/minuto, percepción en la escala de Borg¹² y el paso en 10K. De acuerdo a estudios previos⁹, se encuentra que el paso MLSS

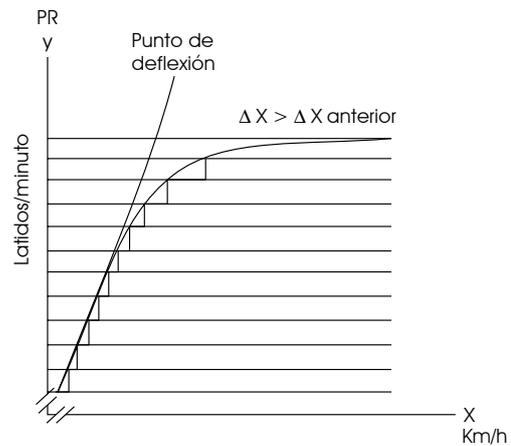


Figura 3. Estimación del punto de deflexión por cálculo de incrementos.

correlaciona 4 diferentes variables: 87% del pulso máximo (PR_{max}), una tasa de respiración de 32 respiros/min, una carga percibida de 12/15 en la escala de Borg, y el paso en una carrera de 10K. En atletas de alto rendimiento el porcentaje de latidos (pulso) puede variar entre 75 y 90% de su máximo⁹. Para validar este método, los autores de la referencia⁹ hicieron pruebas con 12 atletas en una caminadora tomando su concentración de lactato equivalente a 87% de PR_{max} ($V1$), 32 respiros/min ($V2$) y un RPE¹⁴ de 12/15 ($V3$). Combinando los resultados con el paso de 10K ($V4$), calculan el promedio y así obtienen el paso MLSS predicho¹³. Usando muestras de sangre compararon el paso MLSS predicho para ver si es un método confiable. El promedio predicho de paso MLSS fue 249 m/min (metros por minuto), comparado con el promedio validado de MLSS de 253 m/min (1.01% de error). De acuerdo a esta referencia¹² los números fueron muy cercanos y de hecho, el valor predicho no fue mayor que 15 m/min del valor validado en los 12 atletas¹² (1.06% de error máximo). El valor MLSS en m/min es simplemente el promedio de las cuatro variables. Esto es:

$$MLSS = \frac{V1 + V2 + V3 + V4}{4} \quad (1)$$

donde: $V1$ es PR_{max} , $V2$ es el número de respiros/min, $V3$ es la percepción en la escala de Borg, $V4$ es el paso del atleta en 10K. Este es un método apropiado para atletas que quieren conocer su paso MLSS sin necesidad de usar muestras de sangre. Para conocer PR_{max} se recomienda correr a velocidad moderada y cada dos minutos acelerar el paso hasta llegar al agotamiento.

La tasa de latidos al final es PR_{max} . Al segundo día se puede calcular el paso MLSS al correr al 87% de PR_{max} y finalmente evaluar las otras dos variables¹². Cada atleta debe conocer su paso en los 10K. En este método, la tasa de latidos y el paso en 10K son muy rápidos y la tasa de latidos y el RPE muy lentos, pero juntos hacen una buena predicción⁹. Otro método propuesto en la referencia¹² es usar el 85% de PR_{max} y una percepción de Borg = 13/15, sin embargo esta forma no ha sido comprobada¹².

Nota importante: La escala de Borg es comúnmente usada por equipos de alto rendimiento como escala de percepción de esfuerzo (adimensional). La escala va de 0 a 10, de 0 a 15, o de 0 a 20 donde el número menor corresponde una percepción de «inapreciable» y el número mayor corresponde a una percepción de «extremadamente duro». PR_{max} es la máxima tasa de latidos por minuto o el pulso máximo del atleta. RPE hace referencia a la escala de Borg o escala Borg RPE.

Asignación y correlación del nivel de lactato alrededor del punto de deflexión. Conociendo el punto de deflexión o umbral a partir de los métodos que se acaban de presentar, procede la asignación de un nivel de ácido láctico para ese punto. De acuerdo a Janssen en *Training Lactate Pulse-Rate*, el umbral coincide con una concentración de 4 mM/l⁴ pero no es exacto, ya que hay grandes variaciones de un atleta a otro¹⁴. El valor del umbral puede ser tan bajo como 2 ó 3 mM/l o tan alto como 6 u 8 mM/l¹⁴ y no siempre permanece fijo. La única forma realmente precisa de conocer este valor es haciendo una prueba de sangre con un analizador de lactato. Cabe mencionar que esta prueba sólo se tendría que hacer una sola vez y en modelos posteriores se hacen diversas consideraciones para predecir variaciones, incluso en el valor de lactato en el punto de deflexión.

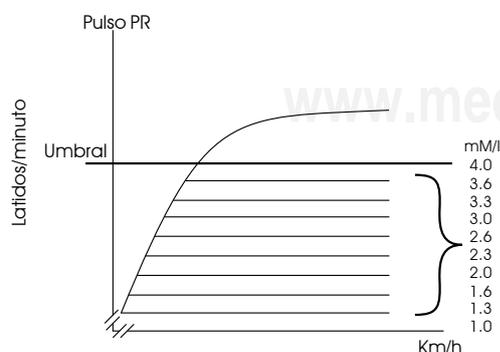


Figura 4. Asignación de nivel de lactato antes del umbral.

Al tener un nivel de lactato en el punto de deflexión, corresponde la asignación de niveles de lactato para antes y después de este punto. En el modelo ideal se hace la correlación de nivel de lactato a partir de un valor de pulso (o velocidad). Se sugiere seguir el siguiente método. Antes del umbral la asignación es directa, pues la concentración sube de acuerdo a la velocidad (o al pulso). La forma más apropiada sería poder contar con diversas mediciones de lactato para diferentes valores de pulso (o velocidad) y con ello la asignación y el cálculo serían directos. Sin embargo, se puede hacer una correlación a partir de tablas con tan sólo conocer el nivel de lactato en el umbral. La Figura 4 muestra la asignación a partir de varias mediciones.

Entre más pequeña la división, mayor la asignación de valores. El umbral de 4 mM/l mostrado en la Figura 4 es sólo un ejemplo, y no corresponde al nivel de todos los atletas y para todas las especialidades. Esta forma de deducir el nivel de lactato no es nueva. Más adelante se demuestra y detalla la forma de correlacionar el pulso con el nivel de lactato a partir de estudios realizados⁴. La concentración antes del umbral corresponde al momento en el que la utilización de oxígeno y el desecho generado que predomina es el Acetil-CoA.

Correlación aeróbica a partir de tablas. Janssen⁴ propone una tabla de intensidades de entrenamiento y una tabla de nivel de lactato a partir del pulso que coincide con una investigación realizada por Tool Wagemans con más de una centena de atletas. Existe una tabla para corredores y una tabla para ciclistas. La tabla parece válida siempre y cuando el atleta no tenga cambios de velocidad muy abruptos y se refiere exclusivamente a una correlación antes del punto de deflexión que fijan en 4 mM/l. De acuerdo a Janssen en *Training Lactate Pulse-Rate*, aun y en reposo existe concentración de lactato. Los valores de concentración son de 1 mM/l en reposo a 4 mM/l cuando se llega al umbral. Al usar 4 mM/l como referencia, es posible hacer un adecuamiento para poder usar esta tabla aun y para valores de umbral diferentes de 4 mM/l. Con ayuda de esta tabla se puede correlacionar el nivel de lactato antes del umbral, sin embargo para intensidades mayores al umbral, es necesario deducir el nivel a partir de algún modelo. En el Cuadro 1(a) se muestra la correlación de pulso y lactato para corredores.

Para poder ubicar a un atleta en esta tabla es necesario conocer su pulso en el umbral (4 mM/l) o bien, cualquier otro valor con su correlación en

Cuadro 1. Correlación de lactato a partir del pulso PR⁴.
(a) para corredores

	Lactato de 1 mMol/l	Lactato de 2 mMol/l	Lactato de 2.5 mMol/l	Lactato de 3 mMol/l	Lactato de 4 mMol/l
	122	132	134	137	140
	122	133	135	138	141
	123	134	136	139	142
	124	135	137	140	143
	125	136	138	141	144
	126	137	139	142	145
	127	138	140	142	146
	128	139	141	143	147
	129	140	142	144	148
	129	141	143	145	149
	130	142	144	146	150
	131	143	145	147	151
	132	144	146	148	152
	133	145	147	149	153
	134	146	148	150	154
	135	147	149	151	155
	136	147	150	152	156
	136	148	151	153	157
	137	149	152	154	158
	138	150	153	155	159
	139	151	154	156	160
	140	152	155	157	161
	141	153	156	158	162
	142	154	156	159	163
	142	155	157	160	164
	143	156	158	161	165
	144	157	159	162	166
	145	158	160	163	167
	146	159	161	164	168
	147	160	162	165	169
	148	161	163	166	170
	149	162	164	167	171
	149	163	165	168	172
	150	164	166	169	173
	151	164	167	170	174
	152	165	168	171	175
	153	166	169	172	176
	154	167	170	173	177
	155	168	171	174	178
	156	169	172	175	179
	156	170	173	176	180
	157	171	174	177	181
	158	172	175	178	182
	159	173	176	179	183
	160	174	177	180	184
	161	175	178	181	185
	162	176	179	182	186
	163	177	180	183	187
	163	178	180	183	188
	164	179	181	184	189
	165	180	182	185	190
	166	181	183	186	191
	167	181	184	187	192
	168	182	185	188	193
	169	183	186	189	194
	170	184	187	190	195
	170	185	188	191	196
	171	186	189	192	197
	172	187	190	193	198
	173	188	191	194	199
	174	189	192	195	200

(b) para ciclistas

	Lactato de 1 mMol/l	Lactato de 2 mMol/l	Lactato de 2.5 mMol/l	Lactato de 3 mMol/l	Lactato de 4 mMol/l
	150	124	129	133	137
	151	125	130	133	138
	152	126	131	134	139
	153	127	131	135	140
	154	127	132	136	141
	155	128	133	137	142
	156	129	134	138	143
	157	130	135	139	144
	158	131	136	140	145
	159	131	137	140	146
	160	132	137	141	147
	161	133	138	142	147
	162	134	139	143	148
	163	135	140	144	149
	164	136	141	145	150
	165	136	142	146	151
	166	137	143	147	152
	167	138	143	148	153
	168	139	144	148	154
	169	140	145	149	155
	170	141	146	150	156
	171	141	147	151	157
	172	142	148	152	158
	173	143	149	153	158
	174	144	149	154	159
	175	145	150	155	160
	176	146	151	156	161
	177	146	152	156	162
	178	147	153	157	163
	179	148	154	158	164
	180	149	155	159	165
	181	150	155	160	166
	182	150	156	161	167
	183	151	157	162	168
	184	152	158	163	168
	185	153	159	163	169
	186	154	160	164	170
	187	155	161	165	171
	188	155	161	166	172
	189	156	162	167	173
	190	157	163	168	174
	191	158	164	169	175
	192	159	165	170	176
	193	160	166	171	177
	194	160	167	171	178
	195	161	167	172	179
	196	162	168	173	179
	197	163	169	174	180
	198	164	170	175	181
	199	165	171	176	182
	200	165	172	177	183
	201	166	173	178	184
	202	167	173	178	185
	203	168	174	179	185
	204	169	175	180	187
	205	170	176	181	188
	206	170	177	182	169
	207	171	178	183	190
	208	172	179	184	190
	209	173	179	185	191

Pulso [latidos/minuto]

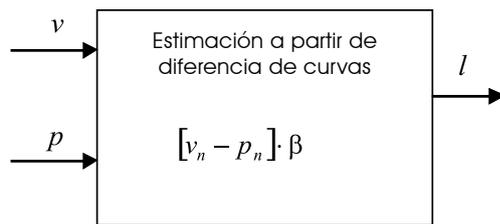


Figura 5. Diagrama del modelo ideal básico para estimación de lactato.

lactato. El Cuadro 1(b) de correlaciones corresponde a ciclistas. Nótese que se incluye una columna de pulso máximo la cual sirve de referencia para ubicar a un atleta dentro de la tabla.

Para puntos intermedios de valores de pulso no incluidos en las tablas, es factible hacer una aproximación (lineal, exponencial, polinomial, logarítmica o de potencias) y predecir el valor del lactato a partir de una ecuación (una ecuación de recta para una aproximación lineal). Por ejemplo, haciendo una aproximación lineal, si un atleta que tiene su umbral de 4 mMol/l en 150 latidos por minuto, y se desea conocer el lactato que lleva cuando corre a un pulso de 148, se obtiene la ecuación de la recta entre los puntos 146 (que corresponde a 3 mMol/l) y 150 a partir de la tabla para corredores.

Ahora el problema se reduce a determinar la cantidad de lactato después del umbral, ya que al hacer una interpolación lineal no produce resultados enteramente correctos.

Modelación después del umbral. Como ya se mencionó anteriormente, diversos modelos pueden generarse a partir del caso más ideal y sencillo. El modelo ideal sugiere hacer una correlación de curvas y sacar el nivel de lactato partiendo de la separación de ambas, o bien se puede calcular el área entre ambas curvas por medio de una integración y así predecir el nivel. Obtener una función que modele la curva de pulso para una persona en particular no es fácil, por lo que el método será una colección de puntos y se deberá basar en la diferencia de la colección de puntos en y de ambas curvas y a partir de esta diferencia inferir el nivel de lactato. La Figura 5 muestra el diagrama a bloques representando el modelo ideal.

Justificación bioquímica. Cuando el atleta alcanza una frecuencia cardiaca máxima pero su rigor sigue en aumento (exigencia de energía), ya no puede suministrar oxígeno y empieza a producir ácido láctico al tratar de metabolizar el piruvato. Por lo tanto, la fórmula del modelo ideal es:

$$l = (v_n - p_n) \cdot \beta + l_u \quad (2)$$

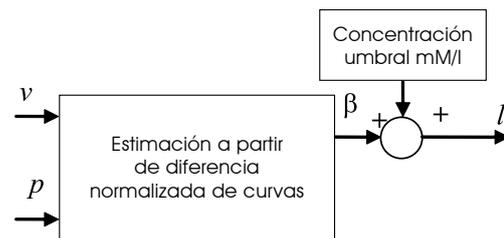


Figura 6. Diagrama a bloques del modelo ideal.

donde v_n es la velocidad normalizada en v_d^\ddagger , p_n es el pulso normalizado al valor de latidos presentes en v_d^\ddagger , β es una constante de ajuste o escalamiento y l es el nivel de ácido láctico. La forma de estimar β es conociendo el valor de lactato máximo en la prueba de Conconi, l_{max} , y el valor de umbral l_u , por medio de la siguiente fórmula:

$$\beta = \frac{l_{max} - l_u}{v_n - p_n} \quad (3)$$

donde l_{max} es la cantidad de lactato máxima observada al final de la prueba de Conconi, l_u es la cantidad de lactato en el punto de deflexión, v_n y p_n son la velocidad y el pulso normalizados a la velocidad y pulso de deflexión, respectivamente.

Para obtener la concentración después del umbral hay que agregar el nivel registrado en el umbral. Con esto un nuevo diagrama a bloques se muestra en la Figura 6. La figura muestra un modelo ideal que puede ser personalizado para cada persona. Es necesario tener presente que el punto de balance o umbral anaeróbico indica el momento en que la producción de ácido láctico se dispara. Jenssen⁴ muestra que la concentración de ácido y el momento donde hay un incremento drástico de nivel es el punto del umbral. La Figura 7 muestra cómo los puntos de deflexión dependen también de la prueba¹⁰. Nótese también en la Figura 8 que el punto de deflexión y el incremento siguiente no es igual para todos los atletas ni para todas las pruebas. Esto es debido a que el valor de β es particular para cada persona, para cada prueba o para cada deporte.

MODELO IDEAL CON FUNCIÓN DE METABOLIZACIÓN

Hasta el momento el modelo ideal sólo ha supuesto la acumulación de lactato, pero no ha sugerido nada en relación a la regeneración de este dese-

[‡] Velocidad en el punto de deflexión o umbral. Cada vez que se menciona v_d^\ddagger se hace referencia al punto de deflexión.

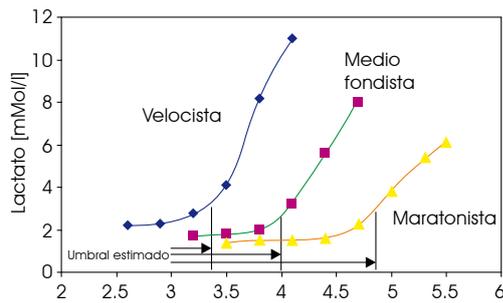


Figura 7. Curvas típicas de lactato y diferencia de comportamientos donde el valor de β varía dependiendo de la prueba¹⁰.

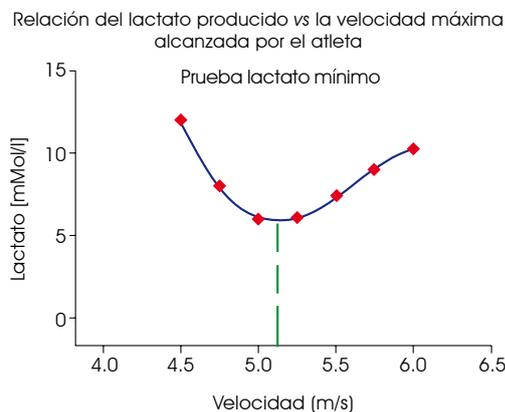


Figura 8. Prueba «Lactato mínimo»¹³. Relación del lactato producido vs la velocidad máxima alcanzada por el atleta.

cho de vuelta a glucógeno. El Cuadro 2 muestra características como el nivel de lactato y el pulso al principio de un recorrido en bicicleta (5 min) y al final (45 min)¹². Se aprecia que son diferentes para cada persona en particular¹².

Como se puede ver, en este experimento los ciclistas No. 1 y No. 5 aumentaron su pulso pero su nivel de lactato disminuyó; los ciclistas No. 2 y 4 aumentaron su pulso pero su nivel de lactato permaneció prácticamente constante y por último el ciclista No. 3 aumentó en pulso y lactato; expertos atribuyen este comportamiento del ciclista No.3 debido a que este ciclista no estaba bien hidratado¹². Nótese que los ciclistas No. 1, No. 2, No. 4 y No. 5 bajaron su nivel de lactato. De este experimento se puede concluir que no basta únicamente tomar en cuenta el pulso y la intensidad de esfuerzo (velocidad para corredores o potencia generada para el caso de ciclistas) para deducir el nivel de lactato. También es necesario la consideración de un factor que disminuye la cantidad de acidez y es característico de cada persona. Además, se puede concluir que cuando un atleta mantiene una intensidad constante, la concentración de ácido

láctico si bien no se mantiene constante, tiene una pequeña variación con el tiempo, comúnmente expresado por una disminución, contrario a lo que se espera hasta ahora. Esto se debe a que existe un factor adicional que es necesario tomar en cuenta y se refiere a la metabolización del ácido.

La Figura 8 muestra una prueba diferente a las que normalmente se hacen para determinar el punto de deflexión. El atleta corre a alta velocidad primero con la intención de acumular lactato en la sangre, y posteriormente empieza la prueba de incrementos constantes como la de Conconi. La prueba empieza a baja velocidad y gradualmente se aumenta. Como se puede ver existe un punto de balance entre la metabolización y la producción de lactato (punto de deflexión o umbral). Esta prueba demuestra la existencia del factor de metabolización.

En un modelo ideal la metabolización supone restar la cantidad metabolizada de ácido de la cantidad acumulada. La Figura 9 muestra una representación en bloques del modelo ideal que incluye un bloque de metabolización.

Matemáticamente este modelo queda:

$$l = l_{curva} - m \quad (4)$$

donde l es el nivel de lactato, l_{curva} es el lactato obtenido de la diferencia de curvas y m es la función de metabolización particular para cada persona. Notar que este modelo aplica solamente para un rendimiento mayor al punto de deflexión (después del umbral). Antes de este punto se asume que las tablas presentadas anteriormente, ya traen implícito el comportamiento de gluconeogénesis^{7,8}.

Metabolización en el modelo ideal. Todo buen entrenador sabe que en una pausa activa hay mejor metabolización de lactato. Matemáticamente esto se entiende como la razón de cambio de la metabolización que crece conforme se aumenta la velocidad. Sin embargo, existe un límite de máxima razón de cambio posible por el organismo. El punto donde existe una máxima razón de cambio se le asigna a v_d en base a lo observado en la Figura 9. Con la siguiente función se consigue tener una razón de cambio que aumenta si aumenta la velocidad del atleta y presenta un máximo valor en v_d .

$$\frac{dl}{dv} = v_d - \frac{v_d - R}{e^{\varepsilon v}} \quad (5)$$

Donde ε es un factor de ajuste que típicamente es igual a 1, R es la velocidad de metabolización en

Cuadro 2. Prueba de lactato en ciclistas⁹.

Ciclista	Lactato		Tasa de latidos		VO ₂		HR	Max VO ₂
	5 Min	45 Min	5 Min	45 Min	5 Min	45 Min		
No. 1	2.3	1.4	159	182	2.0	2.1	190	3.1
No. 2	1.7	1.6	136	150	2.6	2.7	181	4.3
No. 3	2.1	3.1	155	184	3.0	3.5	184	4.8
No. 4	2.4	2.3	159	180	3.6	3.9	191	4.8
No. 5	3.1	2.1	130	152	3.6	3.7	183	4.4

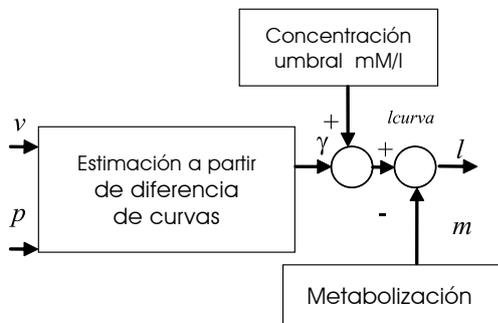


Figura 9. Estimación del lactato incluyendo la metabolización.

reposo que típicamente es igual a 1 mMol/l, v es la velocidad del atleta. La Figura 10(a) muestra el crecimiento de la razón de cambio conforme aumenta la velocidad hasta una v_d máxima de 10 m/s.

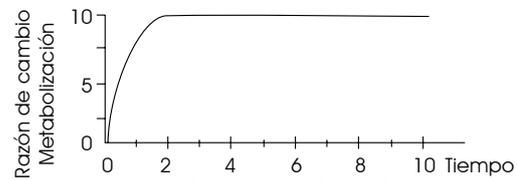
De la ecuación (5) y la figura 10(a) observamos que cuando $v = 0$ la razón de cambio es constante e igual al valor de R (típicamente 1). Cuando $v = 10$ m/s, la razón de cambio será mayor y quedará limitada por v_d . La cantidad de lactato metabolizado l_m con respecto al tiempo se puede representar como sigue:

$$l_m = \frac{dl}{dv} t + l_0 \tag{6}$$

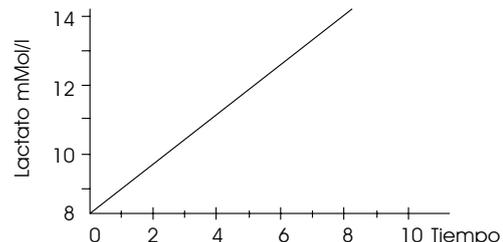
Sustituyendo la razón de cambio y agregando un factor de ajuste para el tiempo, K , que toma el cuerpo en metabolizar por completo la subida de lactato, se obtiene:

$$l_m = \pm \left(v_d - \frac{v_d - R}{e^{kv}} \right) Kt + l_0 \tag{7}$$

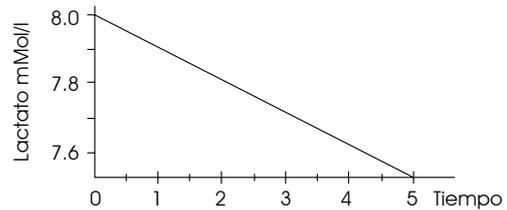
La ecuación (7) representa la cantidad de lactato metabolizado al paso del tiempo donde $k = 0.1$ y define el tiempo en que l_m llegaría a cero a partir de l_0 (lactato inicial). Las gráficas típicas de la cantidad de lactato metabolizado y la disminución una



(a) Lactato metabolizado al aumentar la velocidad



(b) Cantidad de lactato metabolizado



(c) Disminución de la cantidad de lactato

Figura 10. Lactato metabolizado vs velocidad del corredor, y con respecto al tiempo hasta que $v = 0$.

vez que el atleta vuelve al reposo, se ilustran en las Figuras 10(b) y 10(c).

Para identificar el valor de la pendiente ilustrada en la Figura 10(c) se puede realizar un experimento el cual consiste en pedirle al atleta que haga un esfuerzo de intensidad tal que acumule mucho lactato. Estando en reposo se tomarían varias lecturas a partir del comienzo del reposo. De las lecturas se puede hacer una aproximación lineal y se obtiene el valor en que la recta interseca el eje x . Finalmente, esta ecuación será introducida en la ecuación de lactato del modelo ideal mejorado para obtener la concentración o nivel de lactato para cualquier momento.

A partir de la diferencia del pulso y la velocidad correspondiente en la prueba de Conconi, se procede a calcular el lactato de la siguiente forma:

$$l = \gamma (v_n - p) - (v_d - \frac{V_d - R}{e^{v_n}}) \kappa + l_0 \quad (8)$$

donde v_n es la velocidad de la prueba de Conconi normalizada al punto de deflexión que corresponde a PR, p es el pulso que lleva el atleta, R es el nivel de lactato en el reposo, γ (comúnmente alrededor de 10) es el factor de escalamiento de la diferencia de curvas, v_d es la velocidad en el punto de deflexión. El factor κ define el tiempo de caída del nivel de acidez y se define a continuación:

$$\kappa = (v_n - 1.0) \cdot (0.15) \quad (9)$$

El factor de ajuste independiente de la persona se evalúa usando la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{l_f + 1.059 - l_u}{v_{nf} - p_{nf}} \quad (10)$$

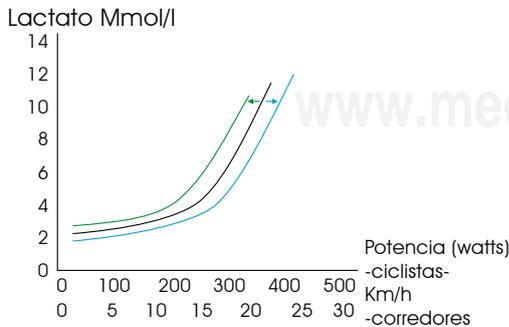
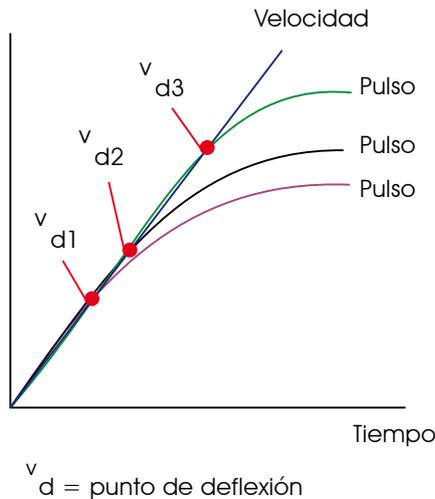


Figura 11. Fenómeno de desplazamiento de curva de lactato por factores externos influyentes.

donde l_f es la cantidad de lactato al final de la prueba de Conconi, v_{nf} es la velocidad final alcanzada en la prueba de Conconi normalizada a la velocidad del punto de deflexión, l_u es la cantidad de lactato en el umbral (punto de deflexión) y p_{nf} es el pulso máximo (PRmax) logrado en la misma prueba normalizado al pulso del punto de deflexión. Por ejemplo, para un pulso normalizado de 1.2 coincidente con velocidad de 1.3 también normalizada para todo t , se tiene: $v_n = 1.75$, $p = 1.2$, $\gamma = 9.82$, (valor tomado de prueba realizada a un atleta del ITEMS)³, $v_d = 10.58$ y $R = 1.8$.

$$l = \gamma (v_n - p) - (V_d - \frac{V_d - R}{e^{v_n}}) \kappa + l_u = \frac{0.68484}{d^{12}} + 8.5758$$

El término t se ha omitido, pues ya no se busca barrer para graficar la curva en tiempo. El único requisito de este modelo para que exista una lectura apropiada es que haya variación de pulso. Los niveles que arroja son muy personalizados y bastante exactos, sobre todo en pruebas de corta duración de acuerdo a los experimentos realizados.

Hasta este momento en un escenario de cambio abrupto de velocidad se consigue un incremento notable de lactato. Sin embargo, si después de este esfuerzo el atleta vuelve a su velocidad normal el modelo regresa su nivel de lactato al de la velocidad normal tan pronto disminuye el pulso. Esto es un problema, pues después de un incremento de lactato la caída en el nivel de éste no es directamente proporcional a la caída en el pulso. Se observa que existe un decremento gradual de lactato. Este problema se corrige en el modelo ponderando los valores finales del cálculo comparando con el valor anterior siempre y cuando haya habido un incremento de acidez. La ponderación se logra con la siguiente expresión:

$$l_{ponderado} = \frac{[l_{anterior} - l]}{2} + l \quad (11)$$

Modelación extendida. Existen factores externos que influyen a modo de alterar los niveles de lactato esperados y que no han sido considerados en los modelos anteriores. Los factores se clasifican en influyentes y no influyentes. Los factores que sí tienen un peso considerable para mover la curva son los factores influyentes y los factores no influyentes son aquellos que su contribución se ve completamente reflejada directamente en el pulso. Los factores influyentes que se pueden considerar son: calor y humedad, hora del día, altitud, reciente entrenamiento, entrenamiento previo o competencia³.

Para estos factores la curva de lactato y por consiguiente el punto de deflexión se desplaza como lo muestra en la Figura 11. Por ello, los modelos presentados tienen que compensarse y adaptarse a la situación y el atleta en particular.

Las adaptaciones y cambios en los modelos tienen que hacerse para asegurar la fidelidad y eficacia de los modelos para predecir los niveles de

lactato. En cuanto al entrenamiento previo como factor influyente, el modelo considera que el atleta tendrá una manera más efectiva de manejar la producción de lactato. Esto es, la curva de lactato vs potencia (o velocidad) como la que se ilustra en la Figura 11 se desplaza hacia la derecha para un atleta cuya producción de lactato se retarda, aun y cuando la potencia o velocidad se incrementen arriba del umbral de deflexión.

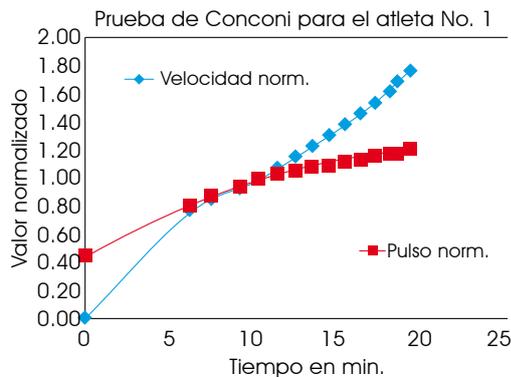


Figura 12. Prueba de Conconi para el atleta No. 1.

DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN CON ATLETAS

A continuación se mostrarán una serie de experimentos realizados después de haber analizado a 4 atletas con la finalidad de validar los modelos y correlaciones desarrolladas mediante la comparación de los resultados con las mediciones que presenta un analizador convencional electrónico de lactato con muestras de sangre (*Accutrend*)¹⁰. Las mediciones se realizan siguiendo los procedimientos y el manejo de la instrumentación indicados por el fabricante del instrumento^{10,14}. Para ello se siguieron

Cuadro 3. Resultados, pruebas de Conconi para el atleta No. 1. Comparación modelos con cálculo de $\beta = 8.46$.

Lactato medición mMol/l	Comparación de modelos: ideal, ideal-mejorado e ideal-mejorado-ponderado, atleta 1								
	Modelo ideal	Error %	Eficiencia %	Modelo ideal mejorado	Error %	Eficiencia %	Modelo ideal ponderado	Error %	Eficiencia %
2.6	3.92			3.91			3.91		
	4.00			3.99			3.99		
3.7	3.70	0.00	100.00	3.70	0.00	100.00	3.70	0.00	100.00
	4.29			4.25			4.25		
	4.19			4.16			4.21		
	4.08			4.06			4.13		
	4.08			4.06			4.09		
3.7	4.08	10.26	89.74	4.06	9.61	90.39	4.07	10.12	89.88
	4.19			4.16			4.16		
	4.19			4.16			4.16		
4.2	4.19	0.27	99.73	4.16	0.97	99.03	4.16	0.97	99.03
	4.19			4.16			4.16		
	4.19			4.16			4.16		
	4.29			4.25			4.25		
	4.08			4.06			4.16		
	4.19			4.16			4.16		
	4.29			4.25			4.25		
	4.19			4.16			4.21		
	4.19			4.16			4.18		
	4.29			4.25			4.25		
	4.08			4.06			4.16		
	4.19			4.16			4.16		
3.8	4.19	10.23	89.77	4.16	9.46	90.54	4.16	9.46	90.54
Promedios		5.19	94.81		5.01	94.99		5.14	94.86

los siguientes pasos: 1) Inicialización del dispositivo Accutrend, 2) Inserción de la franja de medición nueva sobre la cavidad del instrumento, 3) Apertura del compartimiento base donde aparece la franja, 4) Aplicación de una gota de sangre sobre la pista amarilla de la franja. Usando dispositivo de laboratorio, se vierten de 20 a 25 μ litro de sangre, 5) Cerrar inmediatamente el compartimiento base del dispositivo. Una vez concluido el análisis, el aparato envía una señal para desplegar el valor en mmol/

litro de lactato. Se hicieron diversas pruebas para obtener los datos que requieren los modelos. A 3 de los 4 atletas se les hizo la prueba de Conconi para determinar su punto de deflexión. Por último, se realizaron pruebas a velocidad constante tomando muestras de lactato. Al último atleta se le aplicó la misma prueba pero en vez de la de Conconi se le pidió hacer la prueba de Kinderman. El motivo de haber elegido la prueba de Kinderman es para tener una mayor validez de resultados al tener una mayor cantidad de pruebas que justifiquen los resultados. En el primer día se llevaron a cabo las pruebas de Conconi en un ambiente controlado en una caminadora a 25 °C a una altitud de 800 m sobre el nivel del mar y una humedad relativa del 34%. Las demás pruebas se realizaron en pista con las mismas características. El segundo día se hicieron pruebas en pista corriendo a velocidad constante. Para el segundo día las características eran de 22 °C, una humedad relativa del 40% y a la misma altitud.

Para cada prueba se obtiene información de velocidad y pulso. Una vez obtenido el punto de deflexión gráficamente, la velocidad y pulso se normalizan, ambas, con respecto a ese punto. De

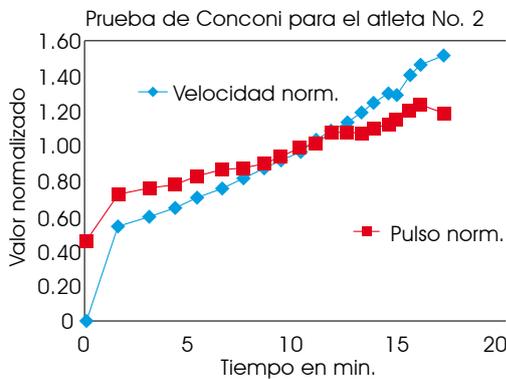


Figura 13. Prueba de Conconi para el atleta No. 2.

Cuadro 4. Resultados, pruebas de Conconi para el atleta No. 2. Comparación modelos.

Lactato medición mMol/l	Comparación de modelos: ideal, ideal-mejorado e ideal-mejorado-ponderado, atleta 2								
	Modelo ideal	Error %	Eficiencia %	Modelo ideal mejorado	Error %	Eficiencia %	Modelo ideal ponderado	Error %	Eficiencia %
2.6									
4.9	5.20	6.12	93.88	5.17	5.51	94.49	5.17	5.51	94.49
	5.19			5.13			5.15		
	5.17			5.10			5.12		
	5.15			5.07			5.09		
5.5	5.24	4.73	95.27	5.18	5.82	94.18	5.18	5.82	94.18
	5.20			5.17			5.17		
	5.15			5.07			5.12		
	5.15			5.07			5.09		
	5.15			5.07			5.08		
6.6	5.15	21.97	78.03	5.07	23.18	76.82	5.07	23.18	76.82
	5.15			5.07			5.07		
	5.15			5.07			5.07		
	5.15			5.07			5.07		
	5.15			5.07			5.07		
5.2	5.15	0.96	99.04	5.07	2.50	97.50	5.07	2.50	97.50
6.4	5.15	19.53	80.47	5.07	20.78	79.22	5.07	20.78	79.22
	5.15			5.07			5.07		
	5.15			5.07			5.07		
	5.15			5.07			5.07		
5.0	5.15	3.00	97.00	5.07	1.40	98.60	5.07	1.40	98.60
Promedios		9.39	90.61		9.87	90.13		9.87	90.13

esta manera se pueden traslapar las gráficas para realizar comparaciones y correlaciones entre ellas. A continuación se ilustran algunos resultados obtenidos con atletas del Tecnológico de Monterrey³.

Atleta No. 1. La primera prueba que se realiza es la de Conconi, con la información obtenida se extraen los datos para alimentar los modelos y comparar los resultados. El atleta No. 1 tiene una edad de 19 años y un peso de 45 kg. La Figura 12 muestra los resultados de la prueba en forma normalizada. La velocidad y el pulso son normalizados al punto de deflexión. Estos dos datos se obtienen después de haber obtenido el punto de deflexión en forma gráfica de datos obtenida en la prueba

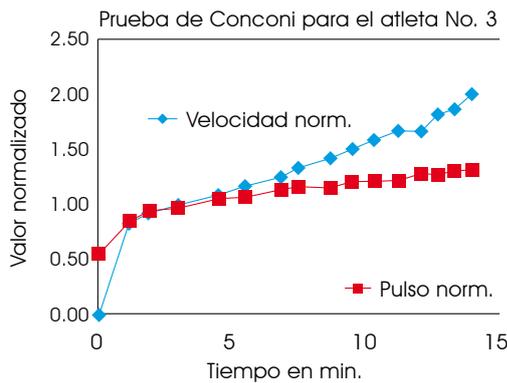


Figura 14. Prueba de Conconi para el atleta No. 3.

de campo. Las predicciones de los modelos se comparan en el Cuadro 3. Los errores porcentuales y su eficiencia (exactitud), fueron evaluados usando: $Error[\%] = |(predicción/medición)100 - 100|$ y $Eficiencia[\%] = 100 - Error[\%]$.

Atleta No. 2. Éste tiene una edad de 20 años y un peso de 65 kg. Se realizó la prueba de Conconi, los resultados normalizados se muestran en la Figura 13. Las predicciones de los modelos se ilustran en el Cuadro 4.

Atleta No. 3. Éste tiene una edad de 19 años y un peso de 56 kg. Se realizó la prueba de Conconi, los resultados se muestran en la Figura 14. Las predicciones de los modelos se ilustran en el Cuadro 5.

Atleta No. 4: Éste tiene una edad de 19 años y un peso de 60 Kg. A este atleta se le aplicó la prueba Kinderman de la cual fueron extraídos los datos que requieren los modelos. La prueba consiste en correr a velocidad constante durante 3 min. Al concluir los 3 minutos hay medio minuto de descanso y se vuelve a empezar la corrida pero a una velocidad 2 km/PR más rápido. La prueba inicia en 10 km/PR y termina hasta que el atleta ya no puede mantener la velocidad. En esta prueba se tomaban muestras de lactato en cada parada. Los resultados de la prueba se muestran en la Figura 15. Para el atleta No. 4 se determina que el punto de deflexión se encuentra en $PR = 180$ latidos/min y $v_d = 13$ km/h (lo cual difícilmente

Cuadro 5. Resultados, pruebas de Conconi para el atleta No. 3. Comparación modelos.

Lactato medición mMol/l	Comparación de modelos: ideal, ideal-mejorado e ideal-mejorado-ponderado, atleta 3								
	Modelo ideal	Error %	Eficiencia %	Modelo ideal mejorado	Error %	Eficiencia %	Modelo ideal ponderado	Error %	Eficiencia %
2.2	4.00			4.71			4.71		
	5.03			5.04			5.04		
	4.95			4.91			4.97		
5.0	4.95			4.91			4.94		
	4.95	1.00	99.00	4.91	1.80	98.20	4.92	1.60	98.40
	4.95			4.91			4.92		
	4.95			4.91			4.91		
	4.95			4.91			4.91		
	4.95			4.91			4.91		
	4.95			4.91			4.91		
	4.95			4.91			4.91		
	4.95			4.91			4.91		
	4.95			4.91			4.91		
4.5	4.95	10.00	90.00	4.91	9.11	90.89	4.91	9.11	90.89
Promedios		5.50	94.50		5.46	94.54		5.36	94.64

sería posible y cualquier entrenador de buen nivel desmentiría inmediatamente). De igual forma se compararon las muestras del analizador *Accutrend*[®] pero los resultados no fueron satisfactorios. La razón del fallo se debe a que en este caso la prueba de Kinderman no fue lo suficientemente apropiada para poder determinar el punto de deflexión ni arrojó suficiente información para poder determinar el punto de deflexión.

Comparación de modelos. El Cuadro 6 ilustra una comparación de la eficiencia de cada modelo. A simple vista los modelos son buenos con excepción del modelo ideal básico debido a los resultados del atleta No. 2. El modelo ideal mejorado no presentó ventaja notable en las pruebas realizadas, sin embargo las eficiencias mayores al 90% indican resultados muy favorables para la implementación de los modelos mencionados en dispositivos de medición no invasivos. Con estos resultados el entrenador puede dosificar los entrenamientos en forma más apropiada. También, una forma de individualizar el modelo para distintos atletas sería factible desarrollando las pruebas específicas por los mismos entrenadores, de tal manera que se generará un perfil individualizado para cada caso. De esta manera el mismo entrenador pudiera dosificar no sólo el entrenamiento,

sino también otras variables importantes como nutrición, relajación y concentración.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se demuestra la factibilidad de incorporar modelos para estimación de lactato en dispositivos portables en forma de reloj de pulsera al momento de realizar ejercicio. Los modelos presentados (modelo ideal, modelo ideal mejorado, modelo ideal mejorado-ponderado) muestran un buen desempeño al registrar aproximadamente 5% de error en su predicción al momento de compararlo con la lectura de un analizador electrónico de muestras de sangre. Este porcentaje de error es bastante aceptable para entrenar atletas. Como preferencia personal se opta por el modelo ideal, pues es el más sencillo y no presenta desventaja notoria en comparación con los otros modelos. La incorporación de algunos de los modelos debe hacerse en un dispositivo que tenga la habilidad de medir el pulso y la velocidad del atleta. Recordar que antes de predecir valores habría que realizar una prueba de Conconi en una caminadora para tomar los datos que serán usados para las correlaciones del modelo. Además sería necesario ingresar algunos otros datos como el valor de lactato al paso del umbral, en reposo y al final de la prueba de Conconi (los cuales se deben realizar en forma tradicional), todo esto a fin de tener mayor exactitud en los cálculos. Una vez realizada la prueba de Conconi el dispositivo podría funcionar sin la necesidad de tomar lecturas de velocidad al correlacionar solamente el pulso con la velocidad que habría de tener a esa tasa de latidos en la prueba de Conconi. La exactitud de la predicción depende mucho de los valores usados en los factores de ajuste de los modelos.

El enfoque de este trabajo se centró en corredores, pero la misma teoría puede ser usada en otras disciplinas, con algunas modificaciones. A pesar de que los resultados de este trabajo son indepen-

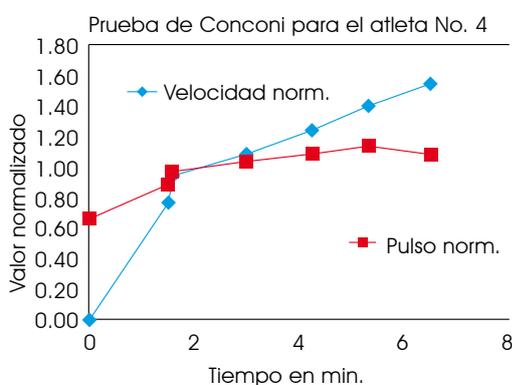


Figura 15. Prueba de Kinderman para el atleta No. 4.

Cuadro 6. Tabla comparativa de modelos.

	Prueba para vd	Modelo ideal		Modelo ideal mejorado		Modelo ideal mejorado-ponderado	
		Eficiencia%	Error %	Eficiencia %	Error %	Eficiencia %	Error %
Atleta 1	Conconi	94.81	5.19	94.99	5.01	94.86	5.14
Atleta 2	Conconi	90.61	9.39	90.13	9.87	90.13	9.87
Atleta 3	Conconi	94.50	5.50	94.54	5.46	94.64	5.36
Atleta 4	Kinderman	91.23	4.38	NA	NA	NA	NA

dientes del deporte realizado, es necesario realizar pruebas más exhaustivas con atletas de otras disciplinas deportivas para incorporar dependencias específicas en cuanto al esfuerzo físico desempeñado (por ejemplo: pesas, lanzamiento de bala, fútbol americano, etc.). Además, se considera de suma importancia realizar un muestreo lo suficientemente significativo para continuar con un estudio estadístico que valide los modelos ilustrados en este trabajo. También, es posible usar los principios de oximetría para la medición de oxígeno y su transmisión inalámbrica cuando el atleta está entrenando. Por ejemplo se podría usar un dispositivo inalámbrico (por ejemplo usando RF-ID) con un oxímetro, de tal manera que se transmita la información de oxígeno en el torrente sanguíneo y de esta manera poder modelar y predecir la generación de lactato en el individuo. El presente trabajo busca apoyar las necesidades del deporte para conocer el nivel de lactato en atletas y poder dosificar en forma más efectiva sus cargas de entrenamiento.

REFERENCIAS

- Maschke M. Apparatus and method for training adjustment in sports, in particular in running sports. US patent 20050164832, Julio 28, 2005.
- Yamasaki YO, Hisashi M, Koji X. Method of and apparatus for measuring lactic acid in organism. US Patent 5757002, Mayo 26, 1998.
- Lemiszka MA. Modelación del nivel de ácido láctico para atletas de alto rendimiento. Tesis de Maestría, Tecnológico de Monterrey, ITESM campus Monterrey, Mayo del 2007.
- Janssen P. Training lactate pulse-rate, Finlandia: Enero 1989.
- Zhou L, Stanley WC, Saidel GM, Yu X, Cabrera ME. Regulation of lactate production at the onset of ischaemia is independent of mitochondrial NADH/NAD⁺: insights from in silico studies. *The Journal of Physiology*, 2005; 569: 925-937. Abstract disponible: <http://jp.physoc.org/cgi/content/abstract/jphysiol.2005.093146v1>.
- McKee T, McKee JR. Bioquímica, la base molecular de la vida, Mc Graw-Hill (España), Tercera edición, 2003.
- Vázquez-Contreras E. Precursores gluconeogénicos. Bioquímica y Biología Molecular en Línea, Comité asesor de publicaciones, Facultad de Medicina e Instituto de Química, UNAM, 2003. [Online]. Disponible en: <http://laguna.fmedic.unam.mx/~evazquez/0403/sustratos%20gluconeogenesis1.html>.
- Marco F. Gluconeogénesis, Universidad Valencia, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, 2006. [Online]. Disponible en: <http://www.uv.es/marcof/Tema17.pdf>.
- Brandon R. Maximal lactate steady state pace: An easy way for runners to estimate Maximal Lactate Steady State pace, 2007 [Online]. Disponible en: <http://www.pponline.co.uk/encyc/0822.htm>.
- Lactate.com. Lactate testing «basic concepts», Diciembre 30, 1998. [Online]. Disponible en: <http://www.lactate.com/pitesbas.html>. 1998.
- Janssen P. Lactate threshold training; Human Kinetics Publishers. USA: 2001.
- Lactate.com. Los latidos del corazón y el lactato. Sports Resource Group, Inc, 1998. [Online] Disponible en: <http://www.lactate.com/escarla.html>.
- Lactate.com. [CD Room]. 2007.
- Baldari C, Bonavolonta V, Emerenziani GP, Gallota MC, Silva AJ, Guidetti L. Accuracy, reliability, linearity of accutrend and lactate pro versus EBIO plus analyzer. *European Journal of Applied Physiology* 2009 ; 107: 105-111, Springer-Verlag.