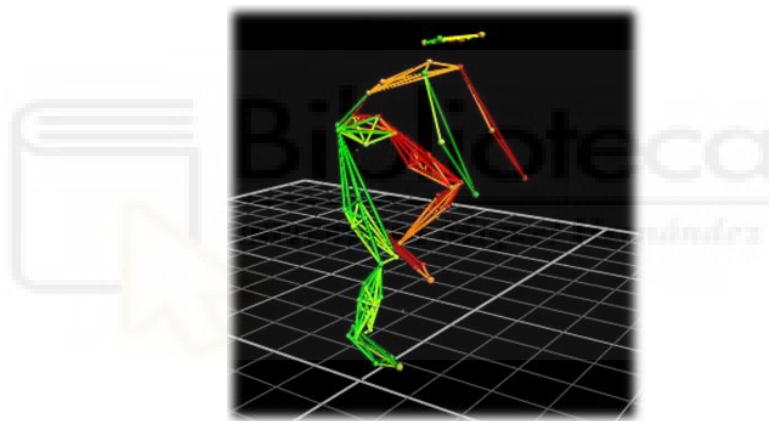


TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Efectos de la fatiga en la cinemática de pedaleo en un test de Umbral de Potencia Funcional



Carlos Albaladejo García

Tutor: Jose Luis López Elvira

Máster en Rendimiento Deportivo y Salud

Curso 2018/19

Resumen

El análisis cinemático es un estudio bastante frecuente en ciclismo tanto para buscar la mejora del rendimiento como para prevenir las lesiones más prevalentes en este deporte. El elevado volumen de práctica y las posturas de flexión forzada de la columna lumbar pueden provocar lesiones por sobreuso, relacionadas con el *mechanical creep*. Con la aparición de la fatiga, la cinemática del tren inferior puede verse afectada hasta el punto de perjudicar el rendimiento, y de aumentar la flexión de la columna lumbar, acrecentando el riesgo de lesión. Teniendo en cuenta las limitaciones con las que cuenta la literatura científica al respecto, todavía queda mucho camino por recorrer en cuanto al papel de la fatiga en la cinemática. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis cinemático de la técnica de pedaleo en un protocolo de fatiga, para observar las variaciones que puedan derivarse de ésta. La hipótesis planteada se basa en la idea de que las tareas de alta intensidad mantenida producen cambios en la cinemática de pedaleo con la aparición la fatiga, afectando tridimensionalmente a las articulaciones del raquis y del tren inferior. Se midió a 20 sujetos en la realización de un test de Umbral de Potencia Funcional (UPF), de 20 min de duración. Se registró una grabación 3D de la cinemática durante 10 s en tres momentos: inicio, mitad y final de la prueba. Se extrajeron, para su análisis, variables cinemáticas relevantes de la columna lumbar, pelvis, cadera, rodilla y tobillo.

Palabras clave: técnica, ciclismo, biomecánica, bikefitting, UPF.

Introducción

En los últimos años, se ha acrecentado el análisis cinemático en ciclismo con diversos fines, entendiendo por cinemática el estudio del movimiento en sus condiciones de espacio y tiempo, independientemente de las causas que lo producen. Por un lado, se ha investigado la influencia de la posición que adopta el ciclista en el rendimiento del mismo, ya sea a través

del *Power Output* (PO) (García-López, Díez-Leal, Ogueta-Alday, Larrazabal y Rodríguez-Marroyo, 2016; Kordi, Fullerton, Passfield y Parker Simpson, 2019) o de la ventaja aerodinámica que se puede obtener mediante la flexión del tronco (Fintelman, Sterling, Hemida y Li, 2014 y 2015; Merkes, Menaspà y Abbiss, 2018). Por otro lado, también se ha descrito la cinemática durante el pedaleo en un intento de dar explicación a las lesiones más prevalentes dentro de este deporte (Van Hoof, Volkaerts, O'Sullivan, Verschueren y Dankaerts, 2012).

Predominantemente aeróbico por su duración (Lucia, Earnest y Arribas, 2003), las evaluaciones del rendimiento en ciclismo van dirigidas a la obtención de parámetros aeróbicos como el consumo máximo de oxígeno ($VO_2\text{max}$), el umbral anaeróbico (UAN) o el Umbral de Potencia Funcional (UPF). Allen, Coggan y McGregor (2019) definieron el UPF como el máximo PO que el ciclista puede mantener a un ritmo constante o ligeramente variable durante una hora. Estos autores (Allen et al., 2019) sugirieron que el 95% del PO medio de una contrarreloj de 20 min también puede determinar el UPF. Esta variable parece ser una herramienta útil para la evaluación de los ciclistas, limitando la duración y las demandas de la prueba (Borszcz, Tramontin, Bossi, Carminatti y Costa, 2018; MacInnis, Thomas y Phillips, 2018; Valenzuela, Morales, Foster, Lucia y de la Villa, 2018). Además, el UPF relativo (W/kg) es buen predictor del $VO_2\text{max}$, y es particularmente relevante para aquellos profesionales que no tengan acceso a analizadores de gases (Denham, Scott-Hamilton, Hagstrom y Gray, 2017). Finalmente, tendríamos una prueba de duración media, que reduciría el estrés fisiológico del protocolo original de una hora y, a su vez, posee mayor ecología que las pruebas de menor duración como el test de Cooper o el 3 minutes all out, más alejadas de situaciones competitivas (Denham et al., 2017).

El alto volumen de entrenamiento y competición puede traer consecuencias negativas a las estructuras osteoarticulares. Por el momento, se cree que mantener el tronco en una

posición de flexión forzada durante largos periodos de tiempo parece ser un factor influyente en la aparición de dolor lumbar en ciclistas (Streisfeld et al., 2016). Aparentemente, la cifosis lumbar aumenta durante el tiempo de práctica (Schulz y Gordon, 2010; Van Hoof et al., 2012), lo que podría explicarse a través del efecto de la gravedad y la deformación del tejido blando de la columna lumbar, conocido como *mechanical creep* (Marsden y Schwellnuss, 2010). Consecuentemente, la columna iría modificando su angulación y adoptando una posición cada vez más flexionada, ya que el tejido ligamentoso y muscular es vencido por la constante carga a la que es sometido al mantener una posición de flexión sostenida por un tiempo prolongado.

Además, durante las largas horas de práctica, la aparición de la fatiga puede causar modificaciones en la cinemática, pudiendo resultar en un cambio en la magnitud y dirección de las fuerzas aplicadas sobre el pedal, y una consecuente pérdida de rendimiento del ciclista (Diefenthaler y Vaz, 2008; Dingwell, Joubert, Diefenthaler y Trinity, 2008). Estas variaciones del movimiento provocadas por la fatiga podrían verse también en estructuras como el raquis, aunque su participación durante el pedaleo está aún sin determinar. Por estos motivos, es de gran relevancia resolver este interrogante.

No obstante, las investigaciones que pretenden estudiar las alteraciones del movimiento en condiciones de fatiga utilizan, en ocasiones, test incrementales hasta la extenuación. De esta forma, podemos encontrarnos la problemática de que la modificación de la técnica de pedaleo sea consecuencia de una adaptación debida a la necesidad de ejercer más potencia. Por tanto, hacer uso de test maximales de intensidad mantenida, como el test de UPF, parece ser una buena alternativa, puesto que los cambios observados vendrán derivados de la fatiga acumulada (Bini y Diefenthaler, 2010). Estudios previos que han utilizado protocolos incrementales encontraron que la técnica de pedaleo se veía afectada en las fases finales del test, viéndose modificaciones en el tobillo y cadera (Bini y Diefenthaler, 2010).

No obstante, estos datos son resultado de la combinación de los efectos de la fatiga y el aumento de la carga durante la tarea.

Tradicionalmente, el análisis cinemático de la técnica en ciclismo ha recogido datos únicamente dentro del plano sagital. Este hecho se justifica, teniendo en cuenta que el plano sagital es en el cual se aplica la fuerza para provocar el movimiento de las bielas y la bicicleta sea impulsada hacia delante. Sin embargo, observar la cinemática en el plano frontal y transversal nos proporcionaría información sobre el contexto que envuelve las fuerzas aplicadas sobre los pedales. Pouliquen et al. (2018) hipotetizaron que, para mantener un pedaleo simétrico dentro del plano sagital en situaciones de intensidad creciente, se producían movimientos compensatorios fuera de éste. Además, movimientos fuera del plano sagital se han asociado a un mayor riesgo de padecer lesiones por sobreuso (Bini et al., 2016). Esta limitación se ha transferido al análisis cinemático en condiciones de fatiga, donde encontramos trabajos que se centran únicamente en el plano sagital. Bini, Diefenthaler y Bolli (2010) observaron una reducción del ángulo medio del tobillo hacia la dorsiflexión. Del mismo modo, la rodilla y cadera tendían a encontrarse más flexionadas en los momentos finales de una prueba maximal de intensidad mantenida.

Tan solo se tiene constancia de un estudio donde se tuvieron en cuenta las tres dimensiones del movimiento en un protocolo de fatiga de intensidad mantenida (Sayers, Tweddle, Every y Wiegand, 2012). Este trabajo concluyó que los participantes tendían a aumentar el rango de movimiento durante la fase de impulso, aumentado la extensión en la cadera y la flexión en el tobillo; al final de la prueba. Además, observaron que cambios de la consistencia de la rotación tibial durante la fase de impulso puede ser indicador de fatiga. No obstante, se siguen obviando estructuras cuyas variaciones de movimiento pueden determinar la aparición de lesiones por sobreuso, como el raquis.

Otra de las limitaciones de los artículos científicos que registran la cinemática en condiciones de fatiga, es la utilización de cicloergómetros electrónicos. Estos aparatos rompen con la ecología de la prueba, puesto que el ajuste de las dimensiones del aparato está limitado, y no se adecúan a las características antropométricas de los ciclistas (Peveler, Bishop, Smith y Richardson, 2004). Una alternativa metodológica para mejorar la ecología de la prueba sería utilizar la bicicleta personal de cada participante, con su ajuste individual al que están adaptados. Así, las condiciones de evaluación se parecerían más a la realidad.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es realizar un análisis cinemático de la técnica en ciclismo en una prueba maximal y de intensidad mantenida, para observar las variaciones que puedan derivarse durante un protocolo de fatiga. La hipótesis que planteamos es que las tareas de alta intensidad mantenida producen cambios en la cinemática de pedaleo con la aparición la fatiga, afectando tridimensionalmente a las articulaciones del raquis y del tren inferior.

Método

Participantes

La muestra estuvo compuesta por 20 sujetos ($n=20$), de los cuales 13 eran hombres y 7 mujeres. La media (\pm SD) de edad, talla, masa y potencia crítica de los participantes era de 31.65 ± 11.42 años, 1.71 ± 0.09 m, 67 ± 9.37 kg y 3.10 ± 0.60 W/kg, respectivamente. Todos ellos tenían una experiencia mínima de tres años en deportes de bicicleta, pudiendo calificar a 13 de ellos como bien entrenados y 7 como entrenados, siguiendo los criterios de frecuencia y duración de entrenamiento de Jeukendrup, Craig y Hawley (2000). Ningún participante reportó dolores ni patologías de ningún tipo en el momento del estudio ni en los seis meses previos al mismo.

Los implicados fueron informados de los procedimientos a los que se iban a someter y posibles riesgos que podían derivarse de éstos, dando su consentimiento voluntario. El

procedimiento llevado a cabo en este estudio contó con la aprobación del Comité de Ética de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Instrumentos de medida

Durante la prueba se registró la cinemática mediante el sistema VICON® MX-T10 de captura de movimiento tridimensional (Vicon Motion Systems Ltd; Oxford, UK), compuesto por 8 cámaras de luz infrarroja con captura de imagen a 200 Hz, controlado por el software Nexus 2.7.1. Se utilizó un modelo de cuarenta y un marcadores esféricos reflectantes que componían un modelo mecánico bilateral descrito más adelante.

Para el registro y el análisis cinético se utilizó el rodillo con potenciómetro Wahoo® KICKR PowerTrainer, validado por Zadow, Kitic, Wu, Smith y Fell (2016) y la APP Wahoo® Fitness: Workout Tracker con un sistema Android.

Procedimiento

El protocolo comenzaba con la colocación de los marcadores reflectantes en lugares anatómicos, conforme se muestra en la Figura 1.

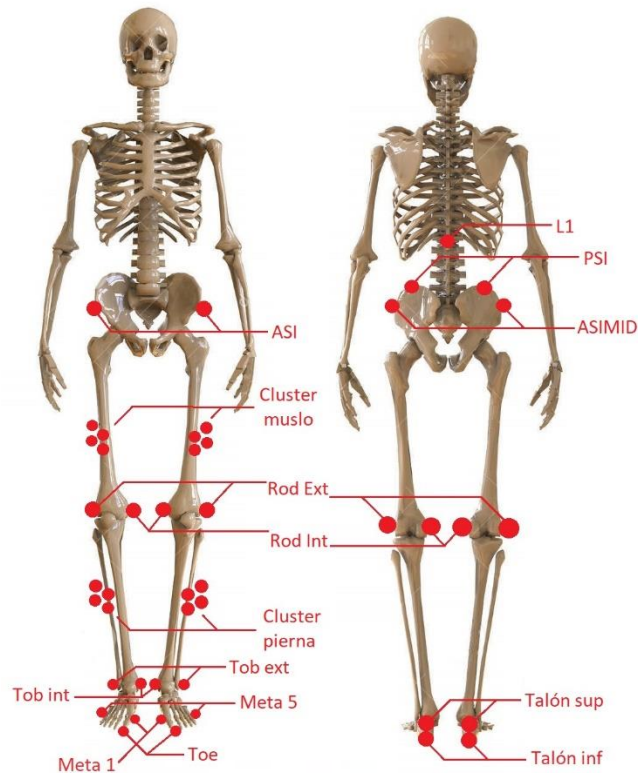


Figura 1. Posición de los marcadores para el análisis de la captura del movimiento.

Seguidamente, se realizó un registro estático de todos los marcadores. Los marcadores de los tobillos y las rodillas (tanto internos como externos) y las espinas ilíacas anterosuperiores eran marcadores de calibración para la captura estática, mientras que los demás se utilizaron para las capturas dinámicas.

Como parte del calentamiento, se realizó un pedaleo de 10 min a 100 W. A continuación, se ejecutaron cinco escalones de 1 min, con aumentos de 25 W entre ellos, para progresar en intensidad. En el último escalón se pretendía alcanzar una intensidad cercana a la esperada durante el test. Para ello, se recogió información sobre mediciones previas o datos de entrenamiento de los participantes, y se ajustó la intensidad de cada escalón para alcanzar en el último de ellos la potencia a la que se pretendía llegar al final de la prueba.

Finalizado el calentamiento y tras 5 min de descanso se iniciaba el protocolo de fatiga. Se utilizó para este caso el test de UPF, en su modalidad de 20 min, comúnmente usado para la valoración del rendimiento anaeróbico. La grabación dinámica de la cinemática se tomó durante 10 s en tres momentos: al inicio, a los 10 min y al final de la prueba.

Análisis de los datos

Antes de proceder con el análisis de los datos, se llevó a cabo un proceso de limpiado y reconstrucción de marcadores, utilizando las herramientas que proporciona el software Nexus 2.7.1.

Durante las grabaciones, se perdieron algunos de los marcadores que no pudieron ser capturados por las cámaras, ya que se desprendían de los sujetos por los efectos del sudor y el movimiento. Por lo tanto, únicamente se pudieron analizar las variables correspondientes a 20 piernas derechas, 13 piernas izquierdas y 18 raquis.

Se extrajeron variables cinemáticas en el plano sagital en puntos discretos del ciclo de pedalada, como el ángulo de las articulaciones de la cadera, rodilla y tobillo en el punto de pedal anterior (biela a 90°) y pedal inferior (biela a 180°), así como los ángulos de máxima y mínima flexión para esas mismas articulaciones durante el ciclo de la pedalada. También se extrajeron datos de la adducción/abducción de rodilla en el plano frontal en los mismos instantes. Se registró la flexión de la columna lumbar y la orientación pélvica en el plano sagital a través de la angulación media, ya que pueden ser variables adecuadas, al hablar de segmentos que no participan en la propulsión, jugando más bien un papel estabilizador. Finalmente, se evaluó la oscilación de la pelvis en el plano frontal, a través de su angulación máxima y mínima.

El análisis estadístico se llevó a cabo con el paquete estadístico SPSS Versión 24, donde se comprobó si la distribución de las variables era normal con el test de Shapiro-Wilk.

Finalmente, se estudiaron las posibles diferencias significativas entre el inicio, mitad y final del test; realizando un ANOVA de medidas repetidas con post-hoc de Bonferroni.

Referencias

Allen, H., Coggan, A. R., y McGregor, S. (2019). *Training and racing with a power meter*.

VeloPress.

Bini, R. R., Dagnese, F., Rocha, E., Silveira, M. C., Carpes, F. P., y Mota, C. B. (2016).

Three-dimensional kinematics of competitive and recreational cyclists across different workloads during cycling. *European Journal of Sport Science*, 16(5), 553–559.

<https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1135984>

Bini, R. R., y Diefenthaler, F. (2010). Kinetics and kinematics analysis of incremental cycling to exhaustion. *Sports Biomechanics*, 9(4), 223-235.

Bini, R. R., Diefenthaler, F., y Bolli, C. (2010). Fatigue effects on the coordinative pattern during cycling : Kinetics and kinematics evaluation. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20(1), 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2008.10.003>

Borszcz, F. K., Tramontin, A. F., Bossi, A. H., Carminatti, L. J., y Costa, V. P. (2018).

Functional threshold power in cyclists: validity of the concept and physiological responses. *International Journal of Sports Medicine*, 39(10), 737-742.

Denham, J., Scott-Hamilton, J., Hagstrom, A. D., y Gray, A. J. (2017). Cycling Power

Outputs Predict Functional Threshold Power And Maximum Oxygen Uptake. *Journal of Strength and conditioning research*.

Diefenthaler, F., y Vaz, M. A. (2008). Aspectos relacionados à fadiga durante o ciclismo:

Uma abordagem biomecânica. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*, 14(5), 472–477. <https://doi.org/10.1590/S1517-86922008000500014>

- Dingwell, J. B., Joubert, J. E., Diefenthaeler, F., y Trinity, J. D. (2008). Changes in muscle activity and kinematics of highly trained cyclists during fatigue. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(11), 2666-2674.
- Fintelman, D. M., Sterling, M., Hemida, H., y Li, F. X. (2014). Optimal cycling time trial position models: Aerodynamics versus power output and metabolic energy. *Journal of Biomechanics*, 47(8), 1894–1898. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.02.029>
- Fintelman, D. M., Sterling, M., Hemida, H., y Li, F. X. (2015). The effect of time trial cycling position on physiological and aerodynamic variables. *Journal of Sports Sciences*, 33(16), 1730–1737. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1009936>
- García-López, J., Díez-Leal, S., Ogueta-Alday, A., Larrazabal, J., y Rodríguez-Marroyo, J. A. (2016). Differences in pedalling technique between road cyclists of different competitive levels. *Journal of Sports Sciences*, 34(17), 1619–1626. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1127987>
- Jeukendrup, A. E., Craig, N. P., y Hawley, J. A. (2000). The bioenergetics of world class cycling. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3(4), 414-433.
- Kordi, M., Fullerton, C., Passfield, L., y Parker Simpson, L. (2019). Influence of upright versus time trial cycling position on determination of critical power and W' in trained cyclists. *European Journal of Sport Science*, 19(2), 192-198. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1495768>.
- Lucia, A., Earnest, C., y Arribas, C. (2003). The Tour de France: a physiological review. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 13(5), 275-283.
- Marsden, M., y Schweltnuss, M. (2010). Lower back pain in cyclists: A review of epidemiology, pathomechanics and risk factors. *International SportMed Journal*, 11(1), 216-225.

- MacInnis, M. J., Thomas, A. C. Q., y Phillips, S. M. (2018) The Reliability of 4-min and 20-min Time Trials and Their Relationships to Functional Threshold Power in Trained Cyclists. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 29(1-27). doi: 10.1123/ijsp.2018-0100.
- Merkes, P. F. J., Menaspà, P., y Abbiss, C. R. (2018). Reducing Aerodynamic Drag by Adopting a Novel Road Cycling Sprint Position. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–20. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0560>
- Peveler, W., Bishop, P., Smith, J., y Richardson, M. (2004). Effects of training in an aero position on anaerobic power output. *Journal of Exercise Physiology Online*, 7(5).
- Pouliquen, C., Nicolas, G., Bideau, B., Garo, G., Megret, A., Delamarche, P., y Bideau, N. (2018). Spatiotemporal analysis of 3D kinematic asymmetry in professional cycling during an incremental test to exhaustion. *Journal of Sports Sciences*, 36(19), 2155–2163. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1432066>
- Sayers, M. G. L., Tweddle, A. L., Every, J., y Wiegand, A. (2012). Changes in drive phase lower limb kinematics during a 60 min cycling time trial. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(2), 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2011.09.002>
- Schulz, S. J., y Gordon, S. J. (2010). Riding position and lumbar spine angle in recreational cyclists: A pilot study. *International Journal of Exercise Science*, 3(4), 174.
- Streisfeld, G. M., Bartoszek, C., Creran, E., Inge, B., McShane, M. D., y Johnston, T. (2016). Relationship Between Body Positioning, Muscle Activity, and Spinal Kinematics in Cyclists With and Without Low Back Pain: A Systematic Review. *Sports Health*, 9(1), 75–79. <https://doi.org/10.1177/1941738116676260>
- Van Hoof, W., Volckaerts, K., O'Sullivan, K., Verschueren, S., y Dankaerts, W. (2012). Comparing lower lumbar kinematics in cyclists with low back pain (flexion pattern)

versus asymptomatic controls – field study using a wireless posture monitoring system.

Manual Therapy, 17(4), 312-317.

Valenzuela, P. L., Morales, J. S., Foster, C., Lucia, A., y de la Villa, P. (2018). Is the

Functional Threshold Power (FTP) a valid surrogate of the lactate threshold?

International Journal of Sports Physiology and Performance, 20(1-6). doi:

10.1123/ijsp.2018-0008.

Zadow, E. K., Kitic, C. M., Wu, S. S., Smith, S. T., y Fell, J. W. (2016). Validity of power

settings of the Wahoo KICKR Power Trainer. *International Journal of Sports Physiology*

and Performance, 11(8), 1115-1117.

