



UNIVERSIDAD FINIS TERRAE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE KINESIOLOGÍA

**COMPARACIÓN DEL DAÑO MUSCULAR INDUCIDO POR
EJERCICIO EN CICLOERGÓMETRO EXCÉNTRICO REALIZADO A
LARGA Y CORTA LONGITUD MUSCULAR EN SUJETOS
JÓVENES SANOS**

CAROLINA VERÓNICA AEDO MUÑOZ
MAYARI DEL PILAR CARTAGENA CARRASCO
ALEJANDRA VALENTINA CONTRERAS GOLDMAN

Tesis para ser presentada en la Escuela de Kinesiología de la Universidad Finis
Terrae para optar al título de Kinesiólogo

Profesor Guía: Dr. Luis Peñailillo Escarate

Santiago de Chile

2015

Carolina V. Aedo M.

Mayari P. Cartagena C.

Alejandra V. Contreras G.

Dr. Luis Peñailillo E.

Dedicatoria

Queremos dedicar esta tesis a todos aquellos que formaron de una u otra forma parte de este proceso, familia, amigos, compañeros y profesores, quienes nos brindaron su apoyo, paciencia, tiempo y consejos para poder cumplir nuestra meta final que es el término de esta carrera. Valoramos su entrega para con nosotros, ya que sin esto, el cumplimiento de nuestra meta no hubiese sido posible.

Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestro profesor guía Dr. Luis Peñailillo por la paciencia, disposición y entrega de conocimientos para poder llevar a cabo esta tesis. Junto con ello también agradecer al profesor Herman Zbinden y al equipo del laboratorio de investigación en salud, por permitir y facilitarnos el uso de éste y sus equipos.

También agradecer de forma especial a los participantes de nuestro estudio que de manera voluntaria accedieron a colaborar con nuestra investigación, quienes mostraron disposición y compromiso con nosotros y la realización de esta tesis.

Agradecer también a nuestros familiares y amigos, por su apoyo incondicional a pesar de las dificultades que surgieron durante este período, por las palabras de aliento, paciencia y tiempo que brindaron para poder terminar este camino.

Finalmente agradecer a la Universidad y el cuerpo docente que estuvieron presentes durante los 5 años de carrera, entregándonos su disposición y conocimientos para nuestro aprendizaje.

Índice de contenidos

	Página
Índice de ilustraciones y tablas.....	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
Glosario y abreviaturas.....	x
Capítulo 1: Introducción.....	1
Capítulo 2: Marco Teórico.....	3
a. Contracción muscular.....	3
b. Ejercicio Excéntrico.....	4
c. Daño muscular inducido por el ejercicio excéntrico.....	6
d. Marcadores de daño muscular.....	8
e. Cicloergómetro excéntrico.....	10
f. Daño y longitud muscular.....	11
g. Pregunta de investigación.....	13
h. Objetivo General.....	13
i. Objetivos Específicos.....	13
j. Hipótesis de Trabajo.....	14
k. Hipótesis Nula.....	14
Capítulo 3: Materiales y métodos.....	15
a. Diseño del estudio	15
b. Universo.....	15
c. Población.....	15
d. Muestreo.....	15
e. Muestra.....	15
f. Criterios de inclusión y exclusión.....	16
g. Metodología.....	16
h. Variables del estudio.....	25
Capítulo 4: Resultados.....	30

Capítulo 5: Discusión.....	37
Conclusión.....	44
Limitaciones.....	45
Bibliografía.....	46
Anexos.....	52

Índice de ilustraciones y tablas

Figura 1	Curva longitud- tensión
Figura 2	Cicloergómetro concéntrico
Figura 3	Cicloergómetro excéntrico
Figura 4	Grupo ECC-C
Figura 5	Grupo ECC-L
Figura 6	Plataforma de fuerza TESys 1000, Globus
Figura 7	Algómetro de presión Force One FDIX, Wagner, USA
Figura 8	Prueba de sentarse y pararse de una silla
Figura 9	Escala lineal de Borg
Figura 10	Sensor de frecuencia cardíaca, Polar electro S825X, Finlandia
Figura 11	Resultados parámetros metabólicos
Figura 12	Resultados FIMV
Figura 13	Resultados PPT
Figura 14	Resultados EVA
Tabla 1	Características antropométricas de la muestra

Resumen

El ejercicio en el cicloergómetro excéntrico puede generar muchos beneficios en la salud, entre los que destaca la ganancia de fuerza muscular a menor demanda metabólica, generación de hipertrofia e incluso la prevención de lesiones músculo-esqueléticas tanto en sujetos sanos como en diferentes poblaciones clínicas. Sin embargo, una desventaja de este tipo de contracción es el daño muscular inducido por el ejercicio. En esta investigación se pretende comparar el daño muscular generado en una sesión de trabajo en cicloergómetro excéntrico a larga y corta longitud muscular. **Método:** 20 hombres sanos divididos en dos grupos: larga (ECC-L) y corta longitud muscular (ECC-C). Constó de cinco visitas al laboratorio, la primera visita consistió en realizar un test incremental de ejercicio en cicloergómetro concéntrico para determinar el peak de potencia concéntrica máxima ($PO_{m\acute{a}x}$). La segunda visita consistió en realizar el ejercicio en cicloergómetro excéntrico al 80% de la $PO_{m\acute{a}x}$ concéntrica durante 30 minutos. Además, la fuerza isométrica máxima voluntaria (FIMV) de cuádriceps, dolor según la escala visual análoga (EVA) y umbral de dolor a la presión (PPT) se evaluaron antes y después, a las 24, 48 y 72 horas post-ejercicio excéntrico. **Resultados:** La frecuencia cardíaca (FC) e índice de esfuerzo percibido (RPE) demostraron ser 9.5% y 23.5% respectivamente mayor para el grupo ECC-L comparado con ECC-C. El grupo ECC-L disminuyó 16.3% más que ECC-C en la FIMV, 21.6% más que ECC-C en el PPT y el EVA aumentó 16.1 mm más que ECC-C. **Conclusión:** Los parámetros metabólicos y daño muscular es mayor para el grupo ECC-L, por lo cual es importante tener en consideración la posición en la que se coloca el asiento para cuando se realice un entrenamiento o rehabilitación.

Palabras clave: cicloergómetro excéntrico, larga longitud muscular, corta longitud muscular, FIMV, PPT, EVA.

Abstract

Eccentric ergometer exercise can lead to many health benefits, which includes the increase of muscle strength at lower metabolic demand, development of hypertrophy and even the prevention of muscular-skeletal injuries with healthy subjects as well and other clinical populations. However, one drawback to this contraction is muscle damage induced by exercise. This study compares muscle damage induced by an eccentric ergometer performed at long and short muscle lengths. **Methods:** 20 healthy men were divided into two groups: long (ECC-L) and short muscle lengths (ECC-C). It comprised of five laboratory visits, the first visit was to perform an incremental exercise test to determine the maximum concentric peak power (POMAX). The second visit was to perform the eccentric cycling at 80% of $PO_{\text{máx}}$ for 30 minutes. Maximal voluntary isometric Force (MVIF) of quadriceps pain on the visual analog scale (VAS) and pain-pressure threshold (PPT) were assessed before and immediately post- and 24, 48 and 72 hours after the cycling. **Results:** heart rate (HR) and rate of perceived exertion (RPE) showed an increase for the ECC-L group compared with ECC-C with 9.5% and 23.5% respectively. The group ECC-L decrease 16.3% more than ECC-C in MVIF, 21.6% more than ECC-C in PPT and the VAS increase an 16.1 mm more than ECC-C. **Conclusion:** This study demonstrates that the metabolic parameters and muscle damage is greater for ECC-L group, therefore it is important to consider the position in which the seat is placed whilst training or during rehabilitation.

Keywords: eccentric ergometer, muscle long length, short muscle length, FIMV, PPT, EVA.

Glosario y abreviaturas

ANOVA	Análisis de varianza
ATP	Adenosin Trifosfato
BF	Bíceps femoral
CK	Creatin kinasa
Ca ²⁺	Calcio
DE	Desviación Estándar
DMIE	Daño muscular inducido por ejercicio
DOMS	Delayed onset muscle soreness (Dolor muscular de aparición tardía)
EC	Excitación-contracción
ECC-C	Ejercicio excéntrico a corta longitud
ECC-L	Ejercicio excéntrico a larga longitud
ELAS	Espina ilíaca anterosuperior
EMG	Electromiografía
EPOC	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
EVA	Escala visual análoga
EVA CAM	Escala visual análoga al caminar
EVA ESC	Escala visual análoga al subir y bajar escaleras
EVA SENT	Escala visual análoga al sentarse
FC	Frecuencia Cardíaca
FIMV	Fuerza isométrica máxima voluntaria
IMC	Índice de masa corporal
N	Newton
NS	No significativo
PO	Potencia
PO _{max} CON	Potencia máxima concéntrica
PO _{max}	Potencia máxima
PPT	Umbral de dolor a la presión

RF	Recto femoral
ROM	Rango de movimiento
RPE	Índice de esfuerzo percibido
RPM	Revoluciones por minuto
RS	Retículo sarcoplásmico
ST	Semitendinoso
VL	Vasto lateral
VM	Vasto medial
VO _{2peak}	Consumo peak de oxígeno
W	Watts
X	Promedio

Capítulo 1: Introducción

Todo movimiento que realizamos en la vida diaria requiere de una contracción muscular, que es el mecanismo que hace posible el desplazamiento corporal y mantenimiento de la postura. Existen 3 tipos de contracción muscular, concéntrica, excéntrica e isométrica. Estas contracciones musculares favorecen la unión de puentes cruzados las cuales van variando su longitud a lo largo del rango de movimiento (Lindstedt S., Lastayo P. & Reich T., 2001). Cuando el sarcómero se mantiene en tensión con una longitud constante, se generan las contracciones isométricas, al acortarse la longitud del sarcómero se producen las contracciones concéntricas que son las que producen el movimiento del cuerpo, como la locomoción o prensión, y cuando un sarcómero activado se estira se producen las llamadas contracciones excéntricas que generan movimientos de antigravedad y frenado. (Schappacher-Tilp G., Leonard T., Desch G. & Herzog W., 2015, Choi S., 2014, Lindstedt S. et al., 2001). Ésta última combina el prefijo ex, que significa "de o lejos," con céntrico, que significa "centro", por lo tanto, es una contracción muscular que se está alejando del centro del músculo. Éste se define como un tipo de ejercicio en el cual el músculo produce fuerza mediante la extensión, funcionando como freno para reducir el movimiento de las extremidades, o como amortiguador para disipar la energía (Choi S., 2014, Lindstedt S. et al., 2001).

De estos tipos de contracción, se ha demostrado que las contracciones excéntricas producen una mayor fuerza muscular que las concéntricas e isométricas (Guilhem G., Cornu C. & Guevel A., 2010, Westing S., Cresswell A. & Thorstensson A., 1991). Aunque tal actividad puede producir una fuerza mayor, el ejercicio excéntrico se caracteriza por una demanda metabólica más baja que el ejercicio concéntrico (Gault, M. L. & Willems, M., 2013). Este tipo de contracción no es algo fuera de lo común, de hecho, una significativa proporción de los movimientos en nuestra vida diaria son realizados por las contracciones excéntricas de distintos músculos, por ejemplo: caminar cuesta abajo o llevar un

vaso de agua devuelta a la mesa (Enoka R., 1996; Fang Y., Siemionow V., Sahgal V., Xiong F. & Yue G., 2001).

El entrenamiento excéntrico ha demostrado grandes beneficios, entre los que destaca la ganancia de fuerza muscular a una menor demanda metabólica, la generación de hipertrofia e incluso la prevención de lesiones músculo-esqueléticas (Guilhem G. et al., 2010). Es por esto que este tipo de contracción ha logrado captar gran atención y cada vez se está utilizando más, tanto en rehabilitación como en entrenamiento deportivo. Una de las modalidades de realización de este ejercicio es la utilización del cicloergómetro excéntrico, el que permite realizar un ejercicio repetitivo, de alta potencia, bajo costo metabólico, multiarticular y sin requerimiento de técnica específica, además de ser una técnica novedosa con resultados positivos en el acondicionamiento deportivo y rehabilitación kinésica.

Uno de los posibles efectos adversos del ejercicio excéntrico es el daño muscular que se genera luego de su práctica. Este daño muscular es asociado a la disminución de fuerza y rango de movimiento y dolor muscular de aparición tardía. El daño muscular inducido por ejercicio excéntrico depende de diversos factores tales como: el número de contracciones excéntricas, el rango de movimiento utilizado y la longitud muscular (Allen D., 2001), los cuales van a depender del grado de entrenamiento del individuo, es decir, aquellos que están más entrenados van a tener menor daño muscular que aquellos desentrenados. Como se mencionó anteriormente el daño muscular también va a depender de la longitud muscular en la que se realiza este ejercicio, se ha visto que este daño muscular es mayor cuando se realiza en longitudes largas que al realizarse en cortas longitudes (Rezaei M. & Ebrahimi-Takamjani I., 2014). Es por esto que este estudio compara el daño muscular producido por una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico realizado a larga y corta longitud muscular.

Capítulo 2: Marco teórico

a. Contracción Muscular

La generación del movimiento, fuerza rápida y una sincronizada dirección, dependerá de una organización estructural de los filamentos contráctiles de actina y miosina del músculo esquelético que se mantienen en una estructura altamente ordenada (Féasson L., Stockholm D., Freyssenet D., Richard I., Duguez S., Beckmann J. & Denis C., 2002). De acuerdo con la teoría de los puentes cruzados de la contracción muscular, la fuerza ejercida por el músculo se genera por la interacción de actina y miosina (Enoka R., 1996). El grado de superposición de estos filamentos va a determinar la longitud del sarcómero, y las variaciones de esta longitud describen la fuerza generada por el músculo. Esto se puede explicar mediante la curva “longitud-tensión” que muestra la relación que existe entre la longitud inicial del sarcómero y la tensión desarrollada cuando la fibra muscular se estimula para contraerse (Williams D., Salcedo M., Irving T., Regnier M. & Daniel T., 2013). En este proceso contráctil, si se establece el mayor número de puentes cruzados, se podrá producir la máxima fuerza isométrica, la cual es generada por el músculo cuando está en su posición de reposo y se activa máximamente, esto se conoce como la longitud de reposo en la curva de longitud-tensión (Williams D. et al., 2013).

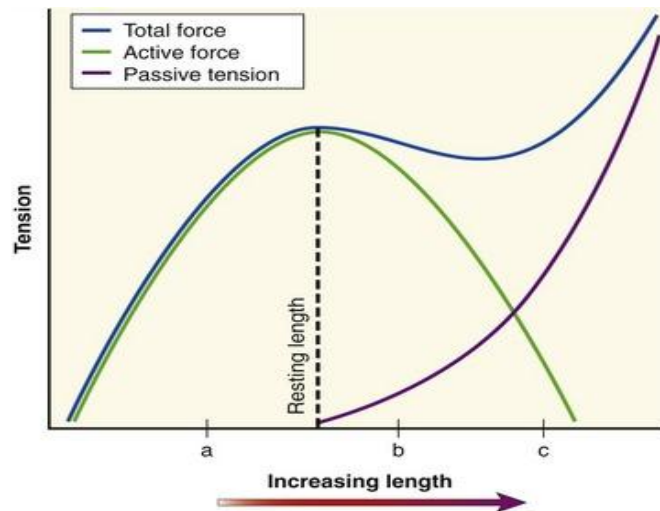


Figura 1: Curva longitud-tensión de una fibra (Rubio-Sobrino P. et al, 2012)

En la curva de la Figura 1, se muestra la tensión total generada en un músculo, que es una sumatoria de dos componentes: Tensión activa, la que corresponde al elemento contráctil y la tensión pasiva debida al elemento elástico (tejido conectivo) (Williams D. et al., 2013). Cuando el vientre muscular se contrae, la combinación de las tensiones activa y pasiva produce la tensión total. La curva demuestra que a medida que un músculo se estira progresivamente más allá de su longitud de reposo, la tensión pasiva crece y la activa decrece (Pozo P., 2010).

b. Ejercicio excéntrico

Las contracciones excéntricas se producen cuando la tensión desarrollada en el músculo es menor que la resistencia externa, y por lo tanto el músculo se alarga. Existen múltiples beneficios del ejercicio excéntrico, tanto agudos como crónicos. Dentro de los beneficios agudos encontramos que este tipo de actividad muscular desarrolla mayor tensión que las acciones concéntricas con un requerimiento menor de energía, lo que se relaciona con la teoría de los filamentos deslizantes que explica que el gasto energético de la contracción muscular deriva del proceso de ruptura de los puentes cruzados de actina y

miosina, por lo que la contracción excéntrica conlleva a un menor costo calórico ya que dichos puentes son forzosamente desactivados por el propio estiramiento de este tipo de contracción sin la necesidad de ATP (Lastayo P., Woolf J., Lewek M., Snyder-Mackler L. Reich T. & Lindstedt S., 2003). Por lo tanto, es por este bajo requerimiento energético, que teóricamente podría ser de gran beneficio para las poblaciones que se caracterizan por una baja tolerancia al ejercicio como adultos mayores y pacientes con enfermedades crónicas (Saka T., Akova B., Yazici Z., Sekir U., Gür H. & Ozarda Y., 2009; Hyldahl R. & Hubal M., 2014).

Dentro de los efectos crónicos de este tipo de ejercicio es importante destacar la mayor producción de hipertrofia muscular, la cual se define como un aumento en el tamaño del músculo, y está directamente relacionada con el aumento de la carga de trabajo y el desarrollo de tensión, esto se da como resultado de una mayor capacidad para la generación de fuerza máxima durante las contracciones excéntricas. Además, los protocolos de entrenamiento excéntrico evidencian también mayores incrementos en la fuerza que los protocolos de entrenamiento concéntricos. Sin embargo, estos dos beneficios no se demuestran en una sola sesión de ejercicio excéntrico, ya que son efectos a largo plazo (Farthing J. & Chilibeck P., 2003; Norrbrand L., Pozzo M. & Tesch P., 2008).

Dentro de las cualidades del ejercicio excéntrico se han demostrado también efectos negativos asociados a este tipo de actividad. Estos efectos se manifiestan a través de marcadores de daño muscular que presumiblemente están dados por el exceso de tensión que se genera y los cuales no siempre tienen respuestas similares entre individuos no acostumbrados a ejercicio excéntrico, de hecho, éstas respuestas pueden tener gran variabilidad interindividual debido a factores tales como, el grado de exposición previa al ejercicio excéntrico, edad y género. En sujetos experimentados o familiarizados con este tipo de trabajo las pérdidas de fuerza y el daño muscular parecen ser inferiores e incluso se ha

apuntado que el propio entrenamiento excéntrico promueve mecanismos de protección frente al daño muscular si la intensidad de trabajo es suficientemente alta (Damas F., Traina M., Cassaro F., Paes de Barros R., Cavaglieri C. & Libardi C., 2014).

c. Daño muscular inducido por el ejercicio excéntrico

A pesar de todos los beneficios que este ejercicio otorga, en una contracción excéntrica las fibras musculares se alargan, y se separan por efecto mecánico, en lugar de separarse por acción de ATP como en las concéntricas. Este efecto mecánico, sin duda, provoca altas tensiones y deformaciones en las estructuras afectadas y puede contribuir al daño tisular, además de exponer al músculo al dolor (Enoka R., 1996; Féasson L. et al., 2002).

Producto del daño muscular inducido por la acción excéntrica, existen cambios morfológicos que son evidencia de este daño, tales como aumentos en proteínas específicas musculares en sangre (CK, mioglobina), inflamación y dolor muscular de aparición tardía (DOMS) y fallo en el proceso de acoplamiento excitación-contracción que genera una disminución en la producción de fuerza y rango de movimiento (ROM)(Féasson L. et al., 2002; Howatson G. & Van Someren K. 2007; Nosaka K. & Sakamoto K., 2001).

El músculo como material dúctil, responde al alto nivel de tensión generada por la contracción excéntrica, deformándose. Proske et al. demostraron en biopsias de músculos que fueron ejercitados excéntricamente y que presentaron DOMS, alteraciones morfológicas en los filamentos del músculo que consistieron en una desorganización de las líneas Z, afectando las moléculas de titina (encargadas de mantener la estructura de los elementos contráctiles de la miofibrilla) produciendo un daño selectivo y no uniforme (Proske U. & Morgan D., 2001; Lieber R. & Fridén J., 1999; Calderón-Vélez J. & Figueroa-Gordon L., 2009).

Toda esta interrupción de la ultraestructura del músculo precede el fracaso acoplamiento excitación-contracción y se propone como un factor principal que conduce a la reducción de las propiedades funcionales después de las contracciones excéntricas (Choi S., 2014).

Se ha planteado que el ejercicio excéntrico genera un estiramiento excesivo del sarcómero, lo que conduce a unos sarcómeros más débiles cuando el músculo se estira o se alarga. Estos sarcómeros sobrecargados conducen a una distorsión estructural que se propaga en sentido longitudinal y rápidamente a través de la miofibrilla, lo que lleva a una alteración física de esta estructura y daño de la membrana. Los filamentos finos y gruesos que componen este sarcómero sobrecargado pueden no volver a interdigitar cuando el músculo se relaja. Si esto ocurre continuamente, más sarcómeros se sobrecargarán y se harán no funcionales (Proske U. & Morgan D., 2001, Morgan D. & Allen D., 2006). Una vez que uno o más sarcómeros se han dañado, este daño se puede expandir longitudinalmente hacia los sarcómeros adyacentes en la miofibrilla y transversalmente a las miofibrillas vecinas. La propagación longitudinal y transversal de la lesión también puede afectar a las membranas del retículo sarcoplásmico, túbulos transversales, y sarcolema. Esto podría iniciar un movimiento incontrolado de calcio (Ca^{2+}) en el sarcoplasma, lo que provoca la siguiente etapa en el proceso de daño. Estas anomalías estructurales son evidentes en el músculo después del ejercicio, especialmente el ejercicio que involucra contracciones excéntricas (Enoka R., 1996).

d. Marcadores de daño muscular

Disminución de la Fuerza muscular

La disminución de la fuerza muscular luego de contracciones musculares excéntricas es otro signo típico de este tipo de ejercicio, se puede explicar mediante dos teorías: a) una asociada a la disrupción del sarcómero y b) al fracaso del acoplamiento excitación-contracción (EC). La primera se explica mediante la teoría llamada “falta de homogeneidad del sarcómero” (Hylldahl R. & Hubal M., 2014), que se ha propuesto respecto a la pérdida de fuerza luego del ejercicio excéntrico la cual se produce por una disrupción del sarcolema y por ende se desencadenan respuestas inflamatorias a nivel muscular (Fernández-Gonzalo R., Lundberg T., Álvarez-Álvarez L. & De Paz J., 2014), donde se produce una desorganización de los miofilamentos en la línea Z, el cual se distribuye a lo largo del sarcómero, llegando al punto en que puede desaparecer esta línea. Se cree que estos cambios estructurales pueden ser focales o generalizados (Allen D., 2001).

La otra teoría se explica mediante el fracaso del proceso de acoplamiento EC que es la secuencia de eventos que comienza con la liberación de acetilcolina en la unión neuromuscular y terminando con la liberación de Ca^{2+} desde el retículo sarcoplásmico (RS). El calcio liberado se une a la troponina y se inicia el ciclo de puentes cruzados entre actina y miosina, y con ello la producción de fuerza. Se ha sugerido que debido a que las contracciones excéntricas estiran demasiado los sarcómeros, éstas causan daño a los túbulos T y el RS, lo que resulta en una fuga hacia el interior de Ca^{2+} extracelular y un mayor nivel de Ca^{2+} en reposo. Luego de contracciones musculares excéntricas se produce un aumento local de Ca^{2+} intracelular, que activará proteasas como la calpaína que hidrolizan desmina, causando una pérdida de apoyo estructural e interrupción al sarcómero (Gault, M. & Willems M., 2013). Esto es seguido por necrosis de la fibra

y la infiltración de células inflamatorias que potencian las terminaciones nerviosas y percepción del dolor (Yu J., Liu J., Carlsson L., Thornell L. & Stål P., 2013).

La fuerza muscular se puede reducir en un 50% o más durante las 24 h después del ejercicio, y se recupera poco a poco de 5-10 días dependiendo de la intensidad del ejercicio realizado. En un estudio realizado por Allen D. se evidenció que un músculo estimulado a una alta frecuencia (50 Hz) y de forma excéntrica, tiene un descenso de aproximadamente un 30% de la fuerza en comparación a un músculo estimulado de forma concéntrica y a la misma frecuencia, donde sólo se encontró una reducción de un 8%. Además, el músculo ejercitado con contracciones concéntricas se recuperó a las pocas horas posteriores al ejercicio, no así el músculo estimulado de forma excéntrica, el cual demoró más de 24 horas en volver a su estado previo al ejercicio (Allen D., 2001).

Dolor muscular de aparición tardía

El dolor muscular de aparición tardía (DOMS) puede ocurrir por numerosos complejos factores combinados después del daño muscular inducido por el ejercicio. Las respuestas inflamatorias se producen después de un daño morfológico causado por las contracciones excéntricas (Clarkson P. & Hubal M., 2002), donde las quimiocinas (proteínas de señalización) se liberan en el músculo dañado, por lo que las células inflamatorias tales como neutrófilos y macrófagos se activan (Tidball J, 2011). Debido a la acumulación de células inflamatorias en el sitio dañado, los niveles de bradiquinina, leucotrienos y prostaglandinas se incrementan de forma concomitante (Connolly D., Sayers S. & McHugh M., 2003). Cuando reacciona con el receptor de bradiquinina B2, se puede activar la fosfolipasa, este cambio aísla iones de calcio en la célula y aumenta anormalmente niveles de calcio en la membrana celular mediante la apertura de canales de iones, lo que lleva a la secreción de neurotransmisores tales como sustancia P, que estimula la producción de ácido araquidónico (Murase S.,

Terazawa E., Queme F., Ota H., Matsuda T., Hirate K., Kozaki Y., Katanosaka K., Taguchi T., Urai H., Mizumura K., 2010; Taguchi T., Sato J. & Mizumura K., 2005). Debido al ácido araquidónico, también se incrementan los niveles de prostaglandinas y leucotrienos. Las prostaglandinas y la bradicinina se sabe que son posibles sustratos de DOMS por la interacción directa con las fibras nerviosas aferentes III y IV a través de los receptores del dolor (nociceptores). Por otro lado, los leucotrienos aumentan la permeabilidad vascular resultante de la adhesión de los neutrófilos a las células endoteliales en el sitio dañado. En el momento en que las células inflamatorias se activan en el músculo dañado, la inflamación del músculo es producida por diversos exudados que resulta en un aumento de la presión intramuscular y la sensibilidad de las fibras aferentes tipo III y IV. Cuando éstos estímulos llegan a la corteza cerebral a través de la médula espinal, el dolor muscular se percibe (Cheung K., Hume P., Maxwell L., 2003, Kim J. & Lee J., 2014).

e. Cicloergómetro excéntrico

El cicloergómetro excéntrico tiene la particularidad de ser un entrenamiento que tiene sus inicios en el año 1952 (Abbott B., Bigland B. & Rictchie J., 1952), en el cual se utilizaron dos cicloergómetros conectados entre sí a través de cadenas. En un cicloergómetro un sujeto pedaleaba en sentido anterior de manera concéntrica, y este mismo pedaleo era resistido de manera excéntrica por otro sujeto en el otro cicloergómetro. Los resultados de este estudio demostraron por primera vez que el costo metabólico de este tipo de ejercicio era menor que su par concéntrico. Estos avances han permitido abrir las puertas para los estudios con el cicloergómetro excéntrico, los que han aumentado en los últimos años. Por consiguiente, este tipo de entrenamiento permite realizar un ejercicio repetitivo, de alta potencia, de bajo costo metabólico y multiarticular de forma segura. Actualmente el cicloergómetro excéntrico es una maquina más sofisticada, que posee un motor incorporado en el equipo, el cual genera el

movimiento de los pedales de manera isocinética a una velocidad determinada. Varios estudios realizados con el cicloergómetro excéntrico en los últimos años han arrojado múltiples beneficios en ganancias de fuerza y masa muscular a un bajo costo metabólico del entrenamiento (Peñailillo L., Blazevich A. & Nosaka K., 2014, Peñailillo L., Blazevich A., Numazawa H. & Nosaka K., 2013, Gross M., Luthy F., Kroell J., Muller E., Hoppeler H. & Vogt M., 2010, Hyldahl R & Hubal M., 2014).

f. Daño y longitud muscular

La extensión del daño muscular después del ejercicio excéntrico es dependiente del nivel de entrenamiento, número de contracciones, rango de movimiento, intensidad del ejercicio y de la longitud muscular a la cual se realizan dichas contracciones (Allen D., 2001, Scott K., Rozenek R., Crussemeyer H. & Lacourse M., 2003). Un estudio realizado por McHugh M. & Pasiakos S. donde evaluaron a 10 sujetos que realizaron contracciones excéntricas de rodilla a corta (30-70° de flexión de rodilla) y larga longitud muscular (70-110°) en un dinamómetro isocinético a una intensidad de 90% de su contracción isométrica máxima voluntaria, se demostró que la pérdida de fuerza fue significativamente mayor en el grupo de larga longitud muscular con un peak de fuerza de 77% en comparación con los de corta longitud con un peak de 93% al día siguiente del ejercicio excéntrico. Además, se evidenció un significativo aumento del dolor para el grupo de larga longitud en comparación con los de corta longitud, con un peak al segundo día post ejercicio (McHugh M. & Pasiakos S., 2004). Estos resultados muestran cierta similitud con el estudio realizado por Newham et al. que realizó una comparación entre contracciones excéntricas (30 min.) a corta y larga longitud muscular para flexores de codo, donde se les evaluó su FIMV, cuyos resultados mostraron una disminución de esta un 10% para el grupo de ECC-C y un 30% para el grupo de ECC-L (Newham D., Jones D., Ghosh G. & Aurora P., 1988).

Por todo lo mencionado anteriormente y debido a la escasez de estudios que comparen el daño muscular inducido luego de una sesión en cicloergómetro excéntrico a corta y larga longitud muscular, es que el objetivo del presente estudio es comparar estos efectos incluyendo el estrés cardiometabólico, para determinar la posición adecuada al sentar al sujeto en el cicloergómetro, ya sea en acondicionamiento deportivo, rehabilitación y/o prevención, evitando así el mayor daño muscular y lograr el mejor efecto de este tipo de entrenamiento.

Pregunta de Investigación:

¿Es mayor el estrés cardiometabólico y daño muscular provocado por una sesión de ejercicio excéntrico, cuando se realiza a larga longitud muscular, en comparación con una corta longitud muscular?

Objetivo General:

Comparar el estrés cardiometabólico y daño muscular producido luego de una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a larga y corta longitud muscular en sujetos jóvenes sanos.

Objetivos específicos:

- Determinar la frecuencia cardíaca e índice de esfuerzo percibido durante una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a larga y corta longitud muscular
- Determinar los cambios de fuerza isométrica máxima voluntaria antes y después de una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a larga y corta longitud muscular
- Determinar los cambios en la percepción del dolor muscular de extensores de rodilla antes y después de una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a larga y corta longitud muscular
- Comparar la frecuencia cardíaca e índice de esfuerzo percibido luego de una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a corta y larga longitud muscular

- Comparar la fuerza isométrica máxima voluntaria de extensores de rodilla luego de la sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a larga y corta longitud muscular
- Comparar la percepción de dolor muscular de extensores de rodilla luego de la sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a larga y corta longitud muscular

Hipótesis de trabajo:

El ejercicio excéntrico en cicloergómetro genera mayor estrés cardiometabólico y daño muscular al realizarlo con una longitud muscular larga, en comparación con una corta longitud muscular.

Hipótesis Nula:

El ejercicio excéntrico en cicloergómetro genera mayor estrés cardiometabólico y daño muscular al realizarlo con una corta longitud muscular, en comparación con una larga longitud muscular.

Capítulo 3. Materiales y Métodos

a.- Diseño del estudio

El enfoque del estudio es cuantitativo, finalidad experimental, cronología del tiempo prospectivo y secuencia de eventos longitudinal.

b.- Universo

Hombres entre 18 y 35 años

c.- Población

Varones sanos sin entrenamiento de fuerza de extremidad inferior

d.- Muestreo

Por conveniencia

e.- Muestra

La muestra estará constituida por 20 hombres sanos, entre 18 y 35 años, que no realicen actividad de fortalecimiento de musculatura de extremidad inferior.

f.- Criterio de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Hombres sanos
- Edad entre 18 y 35 años
- Con disponibilidad de tiempo para participar en la investigación
- Participantes con consentimiento informado firmado

Criterios de exclusión:

- Sujetos que realicen ejercicios de fortalecimiento de musculatura de miembro inferior durante los últimos 6 meses
- Sujetos que sean usuarios de algún tipo de suplemento alimenticio durante los últimos 6 meses
- Sujetos que hayan realizado ejercicio en cicloergómetro excéntrico durante los últimos 6 meses
- Personas que estén con tratamiento farmacológico analgésico

g.- Metodología

Participantes

La elección de los participantes se realizó según conveniencia, de acuerdo a los criterios de inclusión y exclusión.

Los participantes fueron divididos en dos grupos: un grupo que realizó ejercicio excéntrico a corta longitud muscular y otro grupo que realizó ejercicio

excéntrico a larga longitud muscular. Cada grupo estuvo constituido por 10 participantes, los cuales fueron seleccionados para cada grupo de forma aleatoria.

Intervención

En la primera sesión se realizó una familiarización, donde se les explicó a los participantes en qué consistía la intervención que realizamos y resolvimos dudas en cuanto a la intervención. Luego se les hizo firmar un consentimiento informado, que contenía la explicación de la intervención a realizar, una vez firmado este documento se procedió a tomar los antecedentes del participante.

En esta sesión se realizó un test incremental de ejercicio en cicloergómetro concéntrico, para determinar el peak de potencia concéntrica máxima ($PO_{máx}$) y su capacidad aeróbica máxima a través de la evaluación de su consumo de oxígeno peak (VO_{2peak}).

La segunda sesión se realizó el tercer día de comenzada nuestra intervención, consistió en realizar el trabajo en cicloergómetro excéntrico al 80% de la $PO_{máx}$ concéntrica durante 30 minutos. Además, se evaluó antes y después del ejercicio en cicloergómetro excéntrico, la fuerza isométrica máxima voluntaria de cuádriceps y el dolor según la escala visual análoga (EVA) y umbral de dolor a la presión (PPT).

En la tercera, cuarta y quinta sesión, que corresponde a las 24, 48 y 72 horas posteriores al ejercicio excéntrico, se realizó una cuantificación del dolor según EVA y PPT y se evaluó la fuerza isométrica máxima voluntaria de cuádriceps. Todo esto es explicado en el siguiente diseño experimental.

Test incremental: determinación del $PO_{\text{máx}}$ y $VO_{2\text{peak}}$

El test comenzó con los sujetos pedaleando a 50 w por 4 minutos, seguido de un incremento de 25 w por minuto hasta el agotamiento voluntario, en el cicloergómetro concéntrico (Figura 2) (LifeFitness, Lifecycle 9500HR Dovetail Recumbent Bike). Simultáneamente se midió frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno dejando un registro de estas mediciones cada minuto durante la evaluación. Estas mediciones se realizaron a través de un sensor de frecuencia cardíaca (Zephyr HxM Smart) y la medición del $VO_{2\text{peak}}$ a través de un analizador de gases espirados de circuito abierto (Medisoft, Bélgica). Se alentó verbalmente a los participantes durante el test para que den su máximo esfuerzo. El día en que los participantes realizaron el test de peak de VO_2 se les familiarizó con las pruebas y mediciones a realizar.



Figura 2: Cicloergómetro concéntrico. LifeFitness, Lifecycle 9500HR Dovetail Recumbent Bike

Ejercicio en cicloergómetro excéntrico

La sesión de cicloergómetro excéntrico fue realizada a 60 revoluciones por minuto (rpm) por 30 minutos al 80% de la $PO_{\text{máx}}$ CON basados en la prueba

incremental de VO_{2peak} . El pedaleo excéntrico se efectuó en una bicicleta estática reclinada que contiene un motor el cual mueve los pedales a una cadencia determinada (Figura 3) (Eccentric Trainer, Metitur, Finlandia). A los participantes se les ordenó resistir el movimiento de los pedales para lograr mantener estable la potencia que se muestra en la pantalla del equipo.

Cuando el sentido de los pedales es en dirección posterior, se solicitó las contracciones excéntricas principalmente de los músculos extensores de la rodilla. Para familiarizarse con el pedaleo, inmediatamente antes de cada pedaleo excéntrico, el participante realizó 5 minutos de pedaleo a 30 rpm intentando acercarse a su carga a realizar. Luego de este pedaleo se continuó con los 30 minutos de ejercicio excéntrico.

El grupo que realizó el pedaleo excéntrico a corta longitud muscular (ECC-C) (Figura 4) realizó un ejercicio en rango de $75^{\circ} \pm 10^{\circ}$ de flexión de rodilla (excursión: 55°). El grupo que realizó el pedaleo de larga longitud muscular (ECC-L) (Figura 5) fue $120^{\circ} \pm 10^{\circ}$ de flexión de rodilla (excursión: 100°).

Se controló la frecuencia cardíaca cada 5 minutos, durante los 30 minutos que duró la evaluación con un sensor de frecuencia cardíaca (Polar electro S825X, Finlandia).



Figura 3: Cicloergómetro Excéntrico. Eccentric Trainer, Metitur, Finlandia.



Figura 4: Grupo ECC-C



Figura 5: Grupo ECC-L

Fuerza isométrica máxima voluntaria

La fuerza isométrica máxima voluntaria de los extensores de la rodilla de la pierna dominante se evaluó en una plataforma de fuerza (Figura 6) (TESys 1000, Globus System) con 90 ° de flexión de rodilla, donde se le pidió al participante que apoyara la planta del pie en una plataforma que se encuentra a 45° de la horizontal. Los participantes realizaron tres intentos de familiarización al

50%, 70% y 80% de su fuerza isométrica máxima. Luego se realizaron los tres intentos de contracción isométrica máxima voluntaria los cuales fueron mantenidos durante tres segundos con 1 min de descanso entre cada contracción. El valor máximo se utilizó para su posterior análisis. Los participantes fueron instruidos para contraer lo más rápido y fuerte como sea posible, y la retroalimentación visual fue proporcionada en tiempo real en una pantalla de ordenador.



Figura 6: Plataforma de fuerza. TESys 1000 (Globus System)

Umbral de dolor a la presión

Para cuantificar el dolor se utilizó el umbral de dolor a la presión (PPT) con un algómetro digital (Force One FDIX, Wagner, USA) (Figura 7) en distintos puntos de ciertos músculos, determinados por la posición en la cual se ubican los puntos de electromiografía superficial descritos en la guía para el posicionamiento de los electrodos de EMG de la SENIAM. Para la evaluación de extensores de rodilla se midió el vasto medial (VM) a 80% de distancia entre la espina iliaca anterosuperior (EIAS) y borde medial de la patela, vasto lateral (VL) a 2/3 de la distancia entre la EIAS y borde lateral de la patela y recto femoral (RF) a 50% de distancia de la EIAS y la patela. El algómetro se ubicó perpendicular al punto (1 cm² de área de estimulación) donde el investigador aplicó gradualmente una presión de 50 kPa·s⁻¹ hasta que el participante manifestó la primera sensación de

dolor en cada músculo. El promedio de las 3 medidas fue utilizado para los análisis. Previo a la evaluación se realizó la misma presión en la pierna contralateral, para que el participante experimente y comprenda cuando debe indicar la primera sensación de dolor.



Figura 7: Algómetro de presión. Force One FDIX, Wagner, USA

Escala Visual Análoga

También se evaluó el dolor mediante la escala visual análoga. Ésta se compone de una línea horizontal o vertical sencilla generalmente 100 mm de longitud. En un extremo contiene la descripción "Ningún dolor" y "Máximo dolor" en el otro.

Esta herramienta está compuesta por un cuestionario de auto-completado, donde se les pide que coloque una línea perpendicular a la línea de EVA en un punto que representa la intensidad del dolor. Se requiere un mínimo de instrucción y puede ser completado dentro de 1 min. La puntuación se determina según la distancia desde el extremo de "Ningún dolor" a la marca indicada se mide utilizando una regla métrica. La puntuación puede variar de 0 a 100 mm, con un número más alto indica mayor intensidad de dolor. De 0-4 mm indican que no hay

dolor, 5-44 mm dolor leve, 45-74 mm dolor moderado y las puntuaciones ≥ 75 mm indican dolor grave (Upadhyay C., Cameron K., Morphy L. & Battistella M., 2014).

Esta evaluación consta de tres mediciones, 1) caminar una distancia de 3 m (EVA CAM), 2) pararse y sentarse 5 veces de una silla (en la cual el participante queda con 90° de flexión de rodilla) (Figura 8) (EVA SENT), y 3) subir y bajar 5 peldaños de una escalera (EVA ESC). La instrucción para cada una de estas pruebas fue que el participante debía enfocarse sólo en el dolor que siente en ambos cuádriceps (Peñailillo L. et al., 2013).



Figura 8: Prueba de sentarse y pararse de una silla

Escala de Borg

Se utilizó la escala de Borg lineal que va desde la puntuación 6 al 20 (Figura 9). Esta escala visualiza la intensidad de la carga de trabajo, indicado por los números 6-20, con una relación proporcional entre el aumento del índice de

esfuerzo percibido y el número de la escala de Borg. Pretende responder a "cuán pesada y agotadora resultó una tarea física" (Loe H., Rognmo O. Saltin B. & Wisloff U., 2013).

Se aplicó inmediatamente posterior a la realización del ejercicio en cicloergómetro concéntrico y en 2 oportunidades en el cicloergómetro excéntrico, a los 15 y 30 minutos de evaluación. Se pidió al participante asociar el esfuerzo realizado durante el ejercicio a un número que visualiza en la tabla que se le mostró (Figura 9), desde una puntuación de 6, asociado a ningún esfuerzo hasta una puntuación de 20 asociado al máximo esfuerzo posible (Eston R., Mickleborough J. & Baltzopoulos V., 1995).

Escala de Borg RPE: ¿Cómo te ha resultado la sesión de hoy?	
6	
7	
8	MUY MUY LIGERA
9	MUY LIGERA
10	
11	LIGERA
12	
13	ALGO DURA
14	
15	DURA (pesada)
16	
17	MUY DURA
18	
19	EXTREMADAMENTE DURA
20	MÁXIMO ESFUERZO POSIBLE

Figura 9: Escala lineal de Borg

Frecuencia cardíaca

Se controló a través del sensor de frecuencia cardíaca (Polar electro S825X, Finlandia) (Figura 10) registrando sus valores cada 5 minutos durante los 30 minutos de duración del ejercicio en cicloergómetro excéntrico.



Figura 10: Sensor de frecuencia cardíaca, Polar electro S825X, Finlandia.

h. Variables del estudio

Variables independientes

- Protocolo excéntrico en cicloergómetro a larga y corta longitud muscular
- Excursión de rango de movimiento de flexión de rodilla

Trabajo excéntrico: En una contracción excéntrica, las fibras musculares se alargan, y se separan por efecto mecánico. Fue realizada en un cicloergómetro excéntrico al 80% de la $PO_{m\acute{a}x}$ CON de cada individuo, durante 30 minutos. Este ejercicio se realizó en dos longitudes musculares, corta equivalente a $75^{\circ} \pm 10^{\circ}$ de flexión de rodilla, y larga, equivalente a $120^{\circ} \pm 10^{\circ}$ de flexión de rodilla.

Rango de excursión de movimiento: Amplitud de movimiento articular. Se utilizó goniómetro para la medición del rango de flexión de rodilla en el cicloergómetro excéntrico, lo que nos permite diferenciar a ambos grupos de estudio, corta y larga longitud muscular. Se utilizaron rangos de $120^{\circ} \pm 10^{\circ}$ a $15^{\circ} \pm 5^{\circ}$ de flexión de rodilla para los participantes de larga longitud muscular y $75^{\circ} \pm 10^{\circ}$ a $15^{\circ} \pm 5^{\circ}$ para los de corta longitud muscular.

Variables dependientes

- Frecuencia cardíaca
- Percepción de esfuerzo
- Fuerza isométrica máxima voluntaria de los extensores de rodilla
- Dolor muscular

Frecuencia cardíaca: Número de veces que se contrae el corazón durante un minuto (latidos por minuto). Se controló a través del sensor de frecuencia cardíaca (Polar electro S825X, Finlandia) (Figura 10) registrando sus valores cada 5 minutos durante los 30 minutos de duración del ejercicio en cicloergómetro excéntrico.

Percepción de esfuerzo: evaluada a través de la escala de Borg lineal que va desde la puntuación 6 al 20 (Figura 9). Esta escala visualiza la intensidad de la carga de trabajo, con una relación proporcional entre el aumento del índice de esfuerzo percibido y el número de la escala de Borg. Pretende responder a "cuán pesada y agotadora resultó una tarea física" (Loe H., Rognmo O. Saltin B. & Wisloff U., 2013). Se evaluó a los 15 y 30 minutos de la sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico.

Fuerza isométrica máxima voluntaria: Es la fuerza que se genera cuando se realiza una contracción voluntaria máxima contra una resistencia, es decir, cuando el músculo está en su posición de reposo y al activarse máximamente, éste puede generar un mayor número de puentes cruzados, generando así mayor fuerza muscular. Se evaluó en la plataforma de fuerza (Tesys 1000, Globus Ergo Systems by Italia) donde se posicionó al sujeto con la pierna dominante en el centro de la plataforma y con un ROM de flexión de rodilla de 90°, realizando una contracción isométrica máxima voluntaria en tres intentos de 3 segundos cada uno, con un minuto de descanso entre cada intento, de los cuales se utilizó el valor más alto para el análisis de los datos.

Dolor: La Asociación Internacional para el Estudio del Dolor definió el dolor como “una experiencia sensitiva y emocional desagradable, asociada a una lesión tisular real o potencial”. La percepción del dolor consta de un sistema neuronal sensitivo (nocioceptores) y unas vías nerviosas aferentes que responden a estímulos nociceptivos tisulares; la nocicepción puede estar influida por diversos factores (p.ej.psicológicos).

Generalmente se utilizan escalas unidimensionales como la escala verbal numérica ó la escala visual analógica (EVA) (Puebla F., 2005).

Umbral de presión de dolor (PPT) es una variable fiable para detectar si existe hiperlgesia en las estructuras superficiales, como la piel, las uñas y los músculos subyacentes. El umbral del dolor se define por la IASP (1986) como "la intensidad mínima de un estímulo que se percibe como dolorosa." Los valores se presentan en Newton (N) (Winger A., Kvarstein G. & Wyller V., 2014). PPT ha demostrado ser una importante herramienta de examen psicofísico para obtener medidas de la sensibilidad al dolor mecánico de tejido profundo (Nikolajsen L., Kristensen A., Pedersen L., Rahbek O., Jensen T. & Moller-Madsen B., 2011).

El dolor se cuantificó mediante dos sistemas: EVA y PPT, los cuales fueron evaluados inmediatamente antes y después del ejercicio en cicloergómetro excéntrico y a las 24, 48 y 72 horas posteriores al ejercicio en cicloergómetro excéntrico.

Variables desconcertantes:

- No comprensión de las instrucciones en las distintas mediciones
- Que el participante no realice su fuerza máxima en cicloergómetro concéntrico
- Que el participante ingiera algún medicamento analgésico durante el periodo de evaluación
- Que el participante no realice una adecuada coordinación en el cicloergómetro excéntrico.

Recolección de datos

Los antecedentes personales de los participantes se recolectan en fichas de datos. Los datos de los resultados de las evaluaciones de fuerza isométrica máxima serán registrados en el programa TESys 1000 (Globus Ergo Systems, Italia)

Análisis estadístico

Se realizó la estadística descriptiva mediante cálculos de media ($\bar{X}$) y desviación estándar (DE) para todas las variables dependientes.

Se utilizó t-test no pareado o independiente para la comparación de la FC, RPE y la potencia promedio del ejercicio excéntrico.

Para el análisis estadístico de los valores entregados por la evaluación a los 2 grupos, se realizó mediante un ANOVA de dos vías para medidas repetidas que comparó la interacción de los grupos ECC-C y ECC-L en el tiempo (Pre-ejercicio, Post-ejercicio, 24, 48 y 72 horas), para cada uno de los marcadores de daño muscular (FIMV, EVA y PPT). Si las diferencias encontradas eran significativas, se realizó un post-hoc utilizando el test de Fisher LSD.

Todo el análisis estadístico fue realizado con el software IBM SPSS Statistics 21 para Mac (SPSS Inc., IBM Company, Armonk, NY, USA). El nivel de significancia fue de $P < 0.05$.

Capítulo 4: Resultados

La estadística se realizó con 20 sujetos que fueron capaces de completar el estudio. La edad promedio del grupo de larga longitud muscular es 23.3 ± 2.2 años y para el grupo de corta longitud muscular es de 24.6 ± 2.5 años, los cuales promediaban un peso de 73.9 ± 8.8 kg para el grupo de larga longitud muscular y 78.8 ± 10.4 kg para el grupo de corta longitud muscular ($P= 0.26$), el promedio de talla es 1.70 ± 0.04 cm para el grupo de larga longitud muscular y 1.76 ± 0.06 cm para el grupo de corta longitud muscular ($P= 0.04$), lo que dio como resultado un IMC promedio de 25.4 ± 3.2 Kg/mt² para el grupo de larga longitud muscular y de 22.5 ± 2.8 Kg/mt² para el grupo de corta longitud muscular ($P= 0.77$). La PO_{máx} CON de los sujetos en el grupo de larga longitud muscular tuvo un promedio de 245 ± 36.8 W y el grupo de corta longitud muscular un promedio de 253 ± 34.2 W, la cual no fue estadísticamente diferente ($P= 0.64$). El VO_{2peak} promedio de los sujetos en el grupo de larga longitud muscular fue de 37.3 ± 7.2 ml/kg/min y para el grupo de corta longitud fue de 37.4 ± 6.8 ml/kg/min ($P= 0.97$). Lo que se demuestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Características antropométricas de la muestra

	Masa corporal (Kg)	Talla (cm)	IMC (kg/mt ²)	PO _{MÁX} CON (w)	VO _{2PEAK} (ml/kg/min)
ECC-L (X ± DE)	73.95 ± 8.8	1.70 ± 0.04	25.4 ± 3.2	245 ± 36.8	37.3 ± 7.2
ECC-C (X ± DE)	78.8 ± 10.4	1.76 ± 0.06	22.5 ± 2.8	253 ± 34.2	37.4 ± 6.8

Respuesta metabólica al ejercicio excéntrico

La PO promedio fue similar ($P=0.07$) entre los grupos de larga longitud muscular (191.8 ± 23.6 watts) y el grupo de corta longitud muscular (211.8 ± 23.4 watts). El grupo de larga longitud muscular promedió una frecuencia cardíaca durante el ejercicio de 146 ± 17.1 lpm y el grupo de corta longitud muscular de 132 ± 16.2 lpm. Por lo que el grupo de ECC-L muscular mostró un 9,5% más alta FC en comparación al grupo de ECC-C ($P= 0.04$) (Figura 11). El grupo de ECC-L muscular tuvo un 23,5% mayor percepción de esfuerzo (RPE) (17 ± 2.1) al realizar el cicloergómetro excéntrico en comparación al grupo de ECC-C (13.8 ± 3.6) con una diferencia significativa entre ambos ($P= 0.03$) (Figura 11).

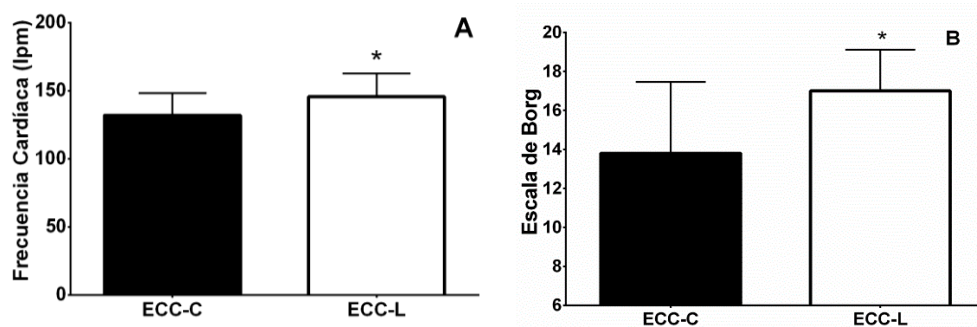


Figura 11: Comparación del promedio de la Frecuencia Cardíaca (A) y percepción del esfuerzo (Escala de Borg) (B) durante los 30 minutos de la sesión de cicloergómetro excéntrico para el grupo de ECC-C y ECC-L. *Significativamente ($P<0.05$) diferente entre grupos.

Marcadores de daño muscular

Fuerza isométrica máxima voluntaria (FIMV)

El ANOVA de dos vías para medidas repetidas encontró un efecto de interacción (grupo x tiempo) significativo ($P= 0.02$). Al realizar la comparación

entre ambos grupos de estudio se mostró una diferencia significativa en el Post-ejercicio ($P= 0.005$), 24 horas ($P= 0.02$) y 48 horas ($P= 0.03$), lo cual no ocurre a las 72 horas ($P= 0.06$).

Los cambios en la FIMV en el grupo de ECC-L en el tiempo evidencian una disminución significativa de esta con un 28,8% Post-ejercicio ($P= 0.001$), en las 24 horas con 35,9% ($P= 0.001$), en las 48 horas con 37,2% ($P= 0.001$) y las 72 horas con un 28,1% ($P= 0.001$). Al analizar los cambios en la FIMV en el grupo de ECC-C en el tiempo encontramos que todos mostraron una disminución significativa con un 17,6% Post-ejercicio ($P= 0.001$), 21,3% a las 24 horas ($P= 0.001$), 20,9% a las 48 horas ($P=0.001$), a excepción de las 72 horas con un 13,7% ($P= 0.008$) en comparación con el Pre-ejercicio. Esto se demuestra en la Figura 12.

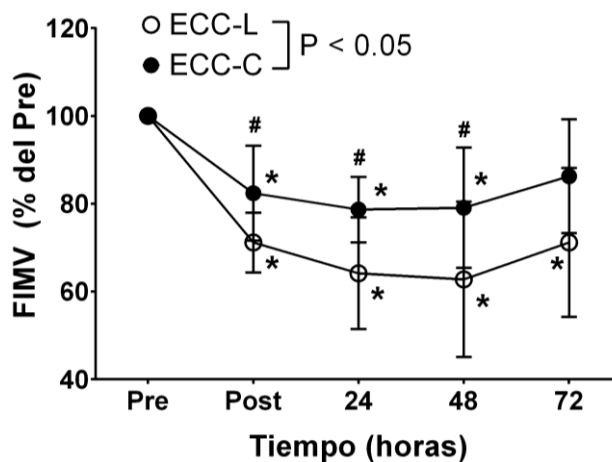


Figura 12: Cambios en la fuerza isométrica máxima voluntaria (FIMV) en relación al Pre-ejercicio, Post-ejercicio, 24, 48 y 72 horas posteriores a la sesión en cicloergómetro excéntrico para corta (ECC-C) y larga longitud muscular (ECC-L). Los valores mostrados representan el promedio $\pm$ desviación estándar. *: Diferencia significativa con el Pre-ejercicio ($P < 0.05$). #: Diferencia significativa entre ECC-L y ECC-C.

Umbral de dolor a la presión (PPT)

Basado en el ANOVA de dos vías para medidas repetidas, se encontró un efecto principal de interacción (grupo x tiempo) en PPT del VM ($P= 0.02$). Sin embargo, esto no se evidencia para el PPT de RF y VL ($P= 0.2$ y $P= 0.1$, respectivamente).

Al comparar ambos grupos de estudio (ECC-L y ECC-C) se observa una diferencia significativa a las 24, 48 y 72 horas ($P= 0.05$, $P= 0.01$ y $P= 0.01$, respectivamente). Al hacer el análisis más específico del porcentaje de cambio del PPT en el músculo VM, se puede apreciar mayores cambios en el grupo ECC-L con una variación de un 17,8-48,9% a diferencia del grupo de ECC-C con una variación que va desde 5,7-33,02% durante todo el período de evaluación.

Los cambios en el PPT VM para el grupo de ECC-L en el tiempo demostró una disminución significativa del PPT en 17,8% Post-ejercicio ($P= 0.004$), a las 24 horas con un 45,4% ($P= 0.001$), a las 48 horas con 48,9% ($P= 0.001$). El grupo de ECC-C en el tiempo demostró una disminución significativa del PPT en 33,02% a las 24 horas ($P= 0.001$), 27,3% a las 48 horas ($P= 0.001$) y 5,3% a las 72 horas ($P= 0.02$). Todo lo anterior se demuestra en la Figura 13.

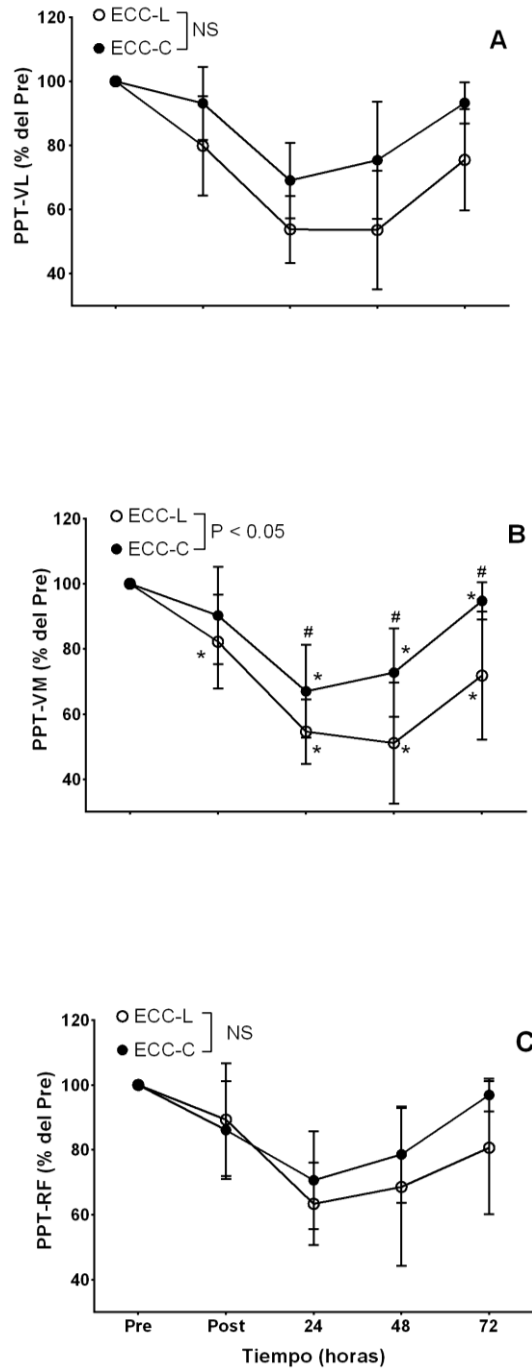


Figura 13: Cambios en el umbral del dolor a la presión (PPT) para los músculos RF (A), VM (B), VL (C), en relación al Pre-ejercicio, Post-ejercicio, 24, 48 y 72 horas posteriores a la sesión en cicloergómetro excéntrico para corta (ECC-C) y larga longitud muscular (ECC-L). Los valores mostrados representan el promedio $\pm$ desviación estándar.

*: Diferencia significativa con el Pre-ejercicio ($P < 0.05$). #: Diferencia significativa entre ECC-L y ECC-C.

Escala visual análoga (EVA)

Teniendo en cuenta el análisis ANOVA de dos vías para medidas repetidas, sólo EVA SENT mostró un efecto principal de interacción (grupos x tiempos) ($P= 0.021$), no ocurrió lo mismo con las variables EVA CAM con un $P=0.1$ y con EVA ESC con un $P= 0.1$. Al comparar ambos grupos de estudio (ECC-L y ECC-C) se encontró una diferencia significativa a las 48 y 72 horas ($P= 0.03$ y $P= 0.01$ respectivamente).

Para el análisis de los cambios en el EVA SENT para el grupo de ECC-L en el tiempo, hubo un aumento significativo del EVA en 28,1 mm a las 24 horas ($P= 0.001$), a las 48 horas 38,5 mm ($P= 0.001$) y a las 72 horas 26,1 mm ($P= 0.001$). Los cambios en el EVA SENT para el grupo ECC-C en el tiempo, se demostró que hubo un aumento significativo del EVA con 9,3 mm Post-ejercicio ($P= 0.02$), a las 24 horas 22,7 mm ($P= 0.002$), a las 48 horas 22,4 mm ($P= 0.001$) y a las 72 horas con 11,1 mm ($P= 0.003$). Lo anterior se demuestra en la Figura 14.

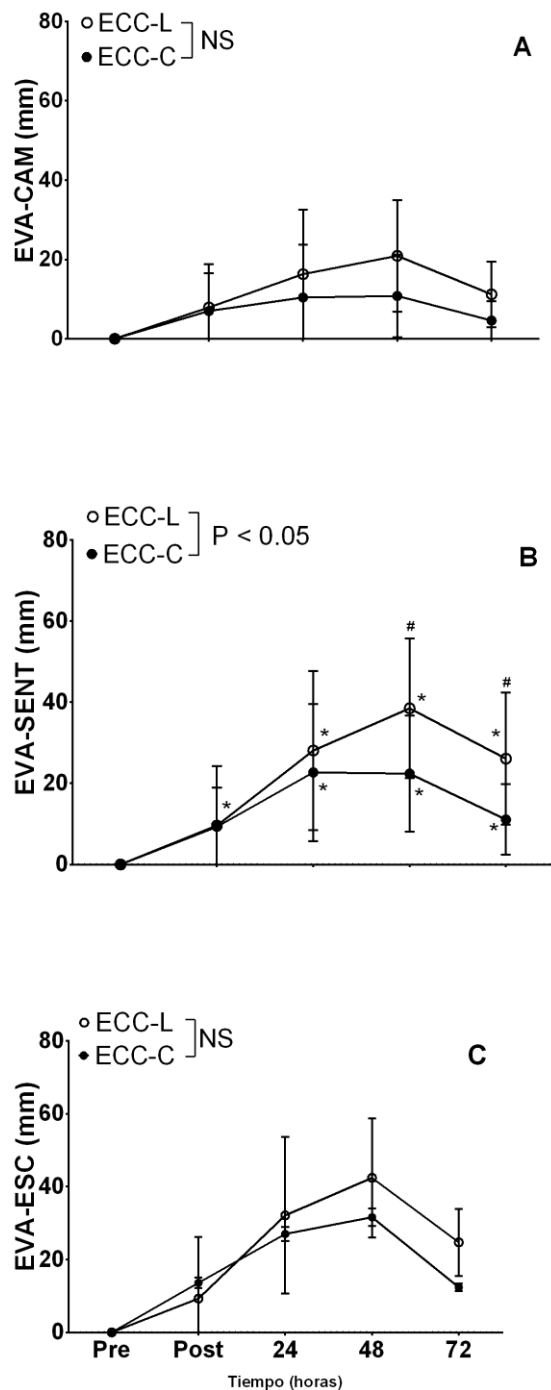


Figura 14: Cambios en el dolor muscular medidos a través de EVA (mm) al caminar (A), sentarse y pararse (B), subir y bajar escaleras (C) en relación al Pre-ejercicio, Post-ejercicio, 24, 48 y 72 horas posteriores a la sesión en cicloergómetro excéntrico para corta (ECC-C) y larga longitud muscular (ECC-L). Los valores mostrados representan el promedio $\pm$ desviación estándar. *: Diferencia significativa con el Pre-ejercicio ($P < 0.05$). #: Diferencia significativa entre ECC-L y ECC-C.

Capítulo 5: Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, el ejercicio en cicloergómetro excéntrico a larga longitud (ECC-L) muscular (sentado adelante), muestra un 9,5% mayor respuesta cardiovascular (FC) y un 23,5% mayor percepción del esfuerzo (RPE), en comparación al grupo a corta longitud (ECC-C) muscular (sentado atrás) a una misma carga (80% $PO_{\text{máx}}$ CON). Esto demuestra un mayor estrés cardiovascular cuando el ejercicio es realizado a ECC-L en comparación con ECC-C. En relación a los marcadores de daño muscular, una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico reduce la FIMV en ambas posiciones, siendo 16,3% mayor la disminución de FIMV para el grupo de ECC-L en comparación con el grupo ECC-C. Además, tanto ECC-L y ECC-C, indujeron DOMS, en ambas evaluaciones (PPT y EVA). Al evaluar el PPT se puede evidenciar que en ambos grupos hubo una disminución del umbral de dolor a la presión (PPT) específicamente del músculo VM. De acuerdo a los resultados de dolor (EVA), se mostró un aumento de este, en ambos grupos, siendo significativamente mayor para el grupo de ECC-L. Así, todo lo anterior confirma nuestra hipótesis que el ejercicio en cicloergómetro excéntrico produce mayor estrés cardiometabólico (aumento de FC y RPE) y daño muscular en el grupo ECC-L en comparación al ECC-C. A continuación, se discutirán los hallazgos encontrados en el presente estudio para las variables de parámetros metabólicos y marcadores de daño muscular inducidos por una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico a corta y larga longitud muscular.

Estrés cardiovascular

Estudios realizados previamente donde se compara el ejercicio en cicloergómetro excéntrico y concéntrico han reportado diferencias significativas en la FC y RPE, donde ambas variables son menores en el ejercicio excéntrico en comparación con el concéntrico (Dufour S., Doutreleau S., Lonsdorfer-Wolf E., Lampert E., Hirth C., Piquard F., Lonsdorfer J., Geny B., Mettauer B. & Richard R., 2006, Chung F., Dean E. & Ross J., 1999). Lo anterior se demuestra en un estudio realizado por Peñailillo et al. donde realiza una comparación entre ejercicio concéntrico y excéntrico realizado en cicloergómetro al 60% de la $PO_{máx}$ CON para la musculatura extensora de rodilla, donde los resultados evidencian que la FC fue entre un 19-29% más baja en el ejercicio excéntrico comparado con el concéntrico, y lo mismo sucede con el RPE con un 22-23% más bajo comparado con el concéntrico (Peñailillo L. et al., 2013). Sin embargo, no existen estudios que aporten información sobre el comportamiento de estos parámetros al comparar un ejercicio en cicloergómetro excéntrico realizado a corta y larga longitud muscular. Nuestros resultados muestran que la FC fue un 9,5% mayor al ser realizada por el grupo de ECC-L comparado con los de ECC-C, lo mismo sucede con el RPE con un 23,5% mayor al compararlos con el grupo ECC-C (Figura 11). Luego de analizar estos datos, nosotros especulamos que la diferencia de los resultados anteriores entre ECC-L y ECC-C se debe a: El mayor rango de flexión de rodilla para el grupo de ECC-L en el protocolo de ejercicio en cicloergómetro excéntrico. Al realizar la resistencia del movimiento en el cicloergómetro excéntrico, el rango de flexión de rodilla en el grupo de ECC-L es mayor, por lo que el brazo de palanca del músculo cuádriceps es menor, dejando así a este músculo en una desventaja mecánica para la generación de fuerza (Luyckx T., Didden K., Vandenneucker H., Labey L., Innocenti B. & Bellemans J., 2008). Junto con esto, el rango de excursión durante el ejercicio en cicloergómetro excéntrico podría explicar también el mayor aumento de la FC y RPE para el grupo de ECC-L (excursión 100°), al ser éste el doble comparado con ECC-C (excursión 55°), ya

que al realizar una mayor excursión y con mayor rango de flexión, el sujeto ejecuta un pedaleo más largo y con mayor fuerza, lo que lleva a que haya un mayor gasto metabólico y por consiguiente mayor FC y RPE.

Daño muscular

Diversos estudios han demostrado que luego de una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico se produce daño muscular expresado por la disminución de la fuerza y dolor muscular (Dufour S. et al., 2006, Chung F. et al., 1999). Nuestros resultados muestran que hay una disminución de la FIMV en ambos grupos de estudio luego del ejercicio excéntrico, lo cual está en línea con estudios realizados por diversos autores, donde se demuestra una disminución de un 30-40% en promedio de la FIMV (Lau W., Muthalib M. & Nosaka K., 2013, Nosaka K., Newton M. & Sacco P., 2005, Newham D. et al., 1988). Es importante destacar que los estudios anteriores son basados en musculatura flexora de codo, lo que podría generar diferentes respuestas frente al daño muscular comparado con extensores de rodilla, ya que la distribución y la orientación de las fibras es distinta en ambos grupos musculares (Saka T., 2009, Friden J. & Lieber R., 2001).

Nuestros resultados evidencian que hay un 11-16% diferencia entre la caída de la FIMV entre ambos grupos de estudio, donde se muestra una mayor disminución de la FIMV en el grupo de ECC-L con un peak de diferencia entre ambos de 16.3% a las 48 horas posteriores al ejercicio excéntrico (37.2% para el grupo ECC-L y un 20.9% para el grupo ECC-C). Estos resultados muestran cierta similitud con el estudio realizado por McHugh & Pasiakos donde 10 sujetos realizaron 120 contracciones excéntricas en dinamómetro isocinético para cuádriceps a corta y larga longitud muscular mostrando una disminución de la FIMV en ambos grupos con 7% para corta y 23% para larga longitud muscular, lo cual se asemeja a nuestro estudio al ser mayor la pérdida de FIMV para el grupo de larga longitud muscular (McHugh M. & Pasiakos S., 2004).

Otro estudio que muestra similitud con el nuestro realizado por Newham et al. que comparó ejercicio excéntrico a corta y larga longitud muscular para flexores de codo, donde se utilizó a 8 sujetos a quienes se les evaluó su FIMV luego de 30 min de realizar contracciones excéntricas de flexores de codo donde cada contracción duro aproximadamente 1 seg. Cada sujeto realizaba con un brazo contracción excéntrica a larga longitud muscular (45-0° de flexión de codo con hombro extendido) y con el otro brazo contracciones excéntricas a corta longitudes muscular (60-0° de flexión de codo con hombro extendido), donde se mostró una disminución de la FIMV de un 10% para el grupo de ECC-C y un 30% para el grupo de ECC-L (Newham D. et al., 1988). La diferencia porcentual de este estudio con el nuestro se puede deber a que la realización de estas investigaciones no fueron en los mismos grupos musculares, por lo que se espera que en extensores de rodilla haya un menor daño expresado en porcentaje que en flexores de codo. Por lo tanto, la disminución de la FIMV mayor en el grupo ECC-L se podría explicar por el daño que se produce en el sarcómero debido al excesivo estiramiento durante la contracción excéntrica, especialmente en este grupo donde el estiramiento es mayor, lo que lleva a alteración a lo largo de las miofibrillas, luego a la membrana y finalmente en el acoplamiento excitación-contracción (Enoka R., 1996, Proske U. & Morgan D., 2001; Morgan D. & Allen D., 2006).

Child R. et al. evaluó la pérdida de fuerza en cuádriceps en 7 sujetos divididos en dos grupos, uno a corta y otro a larga longitud muscular, luego de 75 contracciones excéntricas máximas en un dinamómetro isocinético, mostrando una disminución de la fuerza mayor para el grupo de larga longitud muscular, al igual que nuestro estudio, sin embargo, la recuperación de los sujetos de este estudio fue mucho más lenta que nuestra investigación, llegando a sus niveles basales al décimo día.

En cuanto al dolor muscular luego de realizar ejercicio excéntrico, nuestro estudio mostró que disminuye el umbral del dolor a la presión (PPT) en ambos grupos, siendo esta disminución sólo significativa para el músculo VM, lo que se asemeja a estudios donde se realizó ejercicio excéntrico para el músculo cuádriceps, demostrando un aumento del dolor evaluado en PPT para las porciones distales de este músculo, tanto en la zona medial o lateral (Rezaei M. & Ebrahimi-Takamjani I., 2014, Hedayatpour N., 2008). Al analizar el PPT en VM podemos encontrar que hay un 8-23% de diferencia entre el grupo de larga y corta longitud muscular, siendo mayor la disminución del umbral de dolor para el grupo de ECC-L, teniendo un peak a las 48 horas con un 48.9% comparado con un 27.2% para el grupo ECC-C. Sin embargo, no ocurre lo mismo para el grupo de ECC-C donde el peak de disminución del umbral de dolor a la presión se alcanza a las 24 horas con un 33%. Esto ha sido demostrado anteriormente en estudios donde se ha visto que el peak de dolor percibido fue significativamente más alto entre las 24 y 48 horas después del ejercicio excéntrico (Lau W. et al., 2013, Rezaei M. & Ebrahimi-Takamjani I., 2014, Rodríguez-Casares R. Aguado X., Alegre L., 2012). Un estudio de Hedayatpour N. et al. donde realizaron 4 series de 25 contracciones excéntricas máximas voluntarias en un dinamómetro isocinético a 60° por segundo, evaluó el umbral de dolor a la presión para los músculos VM, RF y VL, también se realizó electromiografía para estos mismos músculos, donde se muestra que la mayor disminución del umbral de dolor fue para las porciones distales y mediales del músculo cuádriceps, lo que se asemeja con nuestro estudio, ya que, nuestros resultados sólo se evidencia una disminución significativa del PPT para el músculo VM.

El dolor muscular evaluado mediante EVA es una de las variables más estudiadas como marcador de daño muscular luego del ejercicio excéntrico, diversos estudios muestran el aumento del dolor luego de realizar este tipo de contracción (Eston R. et al., 1995, Saka T. et al., 2009, Peñailillo L. et al., 2013). En el presente estudio se demuestra un aumento del EVA sólo significativo para EVA SENT. Además, se puede evidenciar que existe una diferencia entre ECC-C y

ECC-L, donde el peak de dolor del grupo ECC-L es a las 48 horas y para ECC-C a las 24 horas. Esto se puede respaldar con diversos estudios que muestran el peak de dolor evaluado mediante EVA a las 48 horas posteriores al ejercicio excéntrico (Child R. et al., 2008, Lau W. et al., 2013, Saka T. et al., 2009). Estos estudios fueron realizados tanto para flexores de codo como para extensores de rodilla mostrando resultados similares a nuestro estudio.

Al realizar una contracción excéntrica se produce daño muscular, esto se debe al estiramiento excesivo del sarcómero que este ejercicio genera, lo que conduce a sarcómeros más débiles y sobrecargados, produciéndose también una distorsión estructural que se propaga en sentido longitudinal y transversal a través de la miofibrilla, lo que lleva a una alteración física de la estructura y daño de la membrana, alterando retículo sarcoplásmico, túbulos transversales y sarcolema, lo que puede generar alteraciones en la liberación de Ca^{2+} y con esto en el acoplamiento de excitación-contracción (Enoka R., 1996, Morgan D. & Allen D., 2006). El proceso de acoplamiento excitación-contracción es fundamental para la generación de fuerza muscular. Luego de una contracción excéntrica donde se produce un estiramiento excesivo del sarcómero, se genera daño en el retículo sarcoplásmico y túbulo T lo que resulta en una fuga de Ca^{2+} al intracelular activando proteasas que generan mayor daño en dicho sarcómero. Como ocurre en nuestro estudio, al generarse un mayor estiramiento del sarcómero en el grupo ECC-L, se produce un mayor daño de éste y por consiguiente se alterará en el proceso acoplamiento excitación-contracción, por lo que afectará en la generación de fuerza (Proske U. & Morgan D., 2001; Morgan D. & Allen D., 2006). Además del uso en rehabilitación y aumento del rendimiento deportivo para lo cual puede ser utilizado el ejercicio excéntrico, es importante tener en consideración uno de los efectos negativos de este tipo de ejercicio, como lo es el daño muscular que se produce luego de este tipo de contracciones. Como vimos en el presente estudio este daño muscular es mayor cuando se realiza ejercicio excéntrico a ECC-L, lo cual nos permite ubicar en una posición adecuada al sujeto a entrenar para evitar

el mayor daño muscular debido a los efectos inmediatos y hasta tres días posteriores a la realización del ejercicio. Estos efectos no son sólo limitados al entrenamiento deportivo, sino que debe tener en cuenta para la rehabilitación de ancianos, pacientes neurológicos, respiratorios, etc. (Beaven C., Willis S., Cook C. & Holmberg H., 2014, Hyldahl R. & Hubal M., 2013). Un review realizado por Isner M. et al. donde se comparó ejercicio excéntrico versus concéntrico, realizado en sujetos con diversas enfermedades crónicas (Enfermedad coronaria, EPOC, diabetes mellitus tipo II, cáncer) mostró distintas mejoras en su patología de base luego de realizar ejercicio excéntrico. Entre las mejoras se encontró un aumento en 14% de la fracción de eyección en el ventrículo izquierdo en los enfermos coronarios, una mejora en la saturación de oxígeno en el caso de los pacientes con EPOC, en los diabéticos mejoró sus niveles de glucosa entre otros beneficios, y en pacientes con cáncer los beneficia al generar un menor gasto energético, considerando que tienen mayor degradación de proteínas, ingesta nutricional más baja y disminución de la actividad física (Isner M., Dufour S., Vautravers P., Geny B., Coudeyre E. & Richard R., 2013). Finalmente, es importante tener en cuenta para este tipo de pacientes que el realizar ejercicio excéntrico a larga longitud muscular conducirá a un mayor daño muscular, lo que puede ser perjudicial para ellos, por los efectos inmediatos y en los días posteriores, como lo hemos visto en nuestra investigación.

Conclusión

Finalizando este estudio, al ver los diversos fenómenos que ocurren luego de la realización de una sesión de ejercicio en cicloergómetro excéntrico, tanto al realizarlo a corta y larga longitud muscular, podemos concluir que de acuerdo a los parámetros metabólicos en el ejercicio en cicloergómetro excéntrico, la FC como el RPE aumentan en ambos grupos siendo mayor para el grupo ECC-L, lo que indica un mayor estrés cardiovascular sistémico. En cuanto al daño muscular que genera el ejercicio en cicloergómetro excéntrico, es expresado en la disminución significativa de la FIMV y en aumento significativo del dolor (EVA y PPT), lo que es evidente en ambos grupos, siendo mayor al realizarlo con ECC-L. Este último efecto ocurre en la totalidad del músculo evaluado (cuádriceps), pero sólo con aumento significativo para el músculo VM. Es importante tener en cuenta este daño muscular que ocurre tanto como efecto inmediato y a los 3 días siguientes, para los sujetos que utilicen esta herramienta, ya sea para un entrenamiento deportivo o en rehabilitación, en ancianos o jóvenes, teniendo en cuenta la ubicación donde se colocará el asiento para que este daño muscular sea reducido al mínimo, debido a la repercusión que este genera en sus actividades de la vida diaria.

En la actualidad el cicloergómetro excéntrico, demuestra ser una herramienta útil para sujetos tanto entrenados como no entrenados, y de distinto grupo etario, por lo que es necesario seguir realizando futuros estudios, que puedan considerar el rango de flexión de rodilla, y la inclusión de otros grupos musculares a la evaluación.

Limitaciones

Las limitaciones con las que nos encontramos durante la realización de este estudio son, en primer lugar es que al ser acotada la cantidad de sujetos evaluados, es difícil extrapolar los resultados a otro tipo de población.

Una segunda limitación de nuestro estudio es el no haber considerado las variables bioquímicas en nuestro estudio, ya que estas podrían demostrar de forma más específica el daño muscular producido luego de una sesión de ejercicio excéntrico.

Bibliografía

- Abbott, B.C., Bigland, B., Ritchie, J.M. (1952). The physiological cost of negative work. *J Physiol*, 117(3),380-90.
- Allen, D. (2001). Eccentric muscle damage: mechanisms of early reduction of force. *Acta Physiol Scand*, 171, 311-319.
- Beaven, C., Willis, S., Cook, C. & Holmberg, H. (2014). Physiological Comparison of Concentric and Eccentric Arm Cycling in Males and Females, *PLOS ONE*, 9(11), e112079.
- Calderón-Vélez, J. y Figueroa-Gordon, L. (2009). El acoplamiento excitación-contracción en el músculo esquelético: preguntas por responder a pesar de 50 años de estudio. *Biomédica*, 29,140-60.
- Cheung, K., Hume, P. & Maxwell, L. (2003). Delayed onset muscle soreness: treatment strategies and performance factors. *Sports Med*, 33,145–164.
- Child, R., Saxton, J. & Donnelly, A. (1998). Comparison of eccentric knee extensor muscle actions at two muscle lengths on indices of damage and anglespecific force production in humans. *Journal of Sports Sciences*,16:4, 301-308.
- Chung, F., Dean, E. & Ross, J. (1999). Cardiopulmonary Responses of Middle-Aged Men Without Cardiopulmonary Disease to Steady- Rate Positive and Negative Work Performed on a Cycle Ergometer. *Phys Ther*, 79, 476-487.
- Choi, S. (2014). Cellular mechanism of eccentric-induced muscle injury and its relationship with sarcomere heterogeneity. *J Exerc Rehabil*, 10(4), 200–204.
- Clarkson, P. & Hubal, M. (2002). Exercise-induced muscle damage in humans. *Am J Phys Med Rehabil*, 81, S52-S69.
- Connolly, D., Sayers, S., McHugh, M. (2003). Treatment and prevention of delayed onset muscle soreness. *J Strength Cond Res*, 17(1), 197-208.
- Damas, F.R., Traina, M.P., Cassaro, F., Paes de Barros, R., Cavaglieri, C.R, Augusto, C. (2014). Muscle soreness and creatine kinase activity after eccentric actions: a cluster analysis. *Rev Bras Med Esporte*, 20, 4.
- Dufour, S., Doutreleau, S., Lonsdorfer-Wolf, E., Lampert, E., Hirth, C., Piquard, F., Lonsdorfer, J., Geny, B., Mettauer, B. & Richard, R. (2006). Deciphering the metabolic and mechanical contributions to the exerciseinduced circulatory

- response: insights from eccentric cycling. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 292, R1641–R1648.
- Elmer, S., Marshall, C., McGinnis, K., Van Haitsma, T & Lastayo, P. (2013). Eccentric arm cycling: physiological characteristic and potential application with healthy populations. *Eur J Appl Physiol*, 113, 2541-2552.
- Enoka, R. M.(1996). Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *J. Appl. Physiol*, 81(6), 2339–2346.
- Eston, R., Mickleborough, J. & Baltzopoulos, V. (1995). Eccentric activation and muscle damage: biomechanical and physiological considerations during downhill running. *Br. J. Sp. Med.*, 29, 89-94.
- Fang, Y., Siemionow, V., Sahgal, V., Xiong, F., Yue, G. (2001). Greater movement-related cortical potential during human eccentric versus concentric muscle contractions. *J Neurophysiol*, 86(4),1764-72.
- Farthing, J., Chilibeck, P.(2003). The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy. *Eur J Appl Physiol*, 89(6), 578-86.
- Féasson, L., Stockholm, D., Freyssenet, D., Richard, I., Duguez, S., Beckmann, J. S., & Denis, C. (2002). Molecular adaptations of neuromuscular disease-associated proteins in response to eccentric exercise in human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 543(Pt 1), 297–306.
- Fernández-Gonzalo, R., Lundberg, T., Álvarez-Álvarez, L. & De Paz, J. (2014). Muscle damage responses and adaptation to eccentric-overload resistance exercise in men and women. *Eur J Appl Physiol*, 114,1075-1084.
- Fridén, J. & Lieber, R. (2001). Eccentric exercise-induced injuries to contractile and cytoskeletal muscle fibre components. *Acta Physiol Scand*, 171, 321-326.
- Gault, M., & Willems, M. (2013). Aging, Functional Capacity and Eccentric Exercise Training. *Aging and Disease*, 4(6), 351–363.
- Gross, M., Luthy, F., Kroell, J., Muller, E., Hoppeler, H. & Vogt, M. (2010). Effects of eccentric cycle ergometry in alpine skiers. *Int J Sports Med*, 31(8),572-6.
- Guilhem, G., Cornu, C. & Guevel, A. (2010). Neuromuscular and muscle-tendon system adaptations to isotonic and isokinetic eccentric exercise. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 53, 319-341.
- Hedayatpour, N. (2008). Sensory and Electromyographic mapping during delayed-onset muscle soreness. *SMI Center for sensory-motor interaction*, 326-334.

- Howatson, G. & Van Someren, K. (2007). Evidence of a contralateral repeated bout effect after maximal eccentric contractions. *Eur J Appl Physiol*, 101, 207–214.
- Hyldahl, R. & Hubal, M. (2014). Lengthening our perspective: morphological, cellular, and molecular responses to eccentric exercise. *Muscle Nerve*, 49(2), 155-70.
- Isner, M., Dufour, S., Vautravers, P., Geny, B., Coudeyre, E. & Richard, R. (2013). Eccentric exercise training: Modalities, application and perspectives. *Sport Med*, 43, 483-512.
- Kim, J. & Lee, J. (2014). A review of nutritional intervention on delayed onset muscle soreness. Part I. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 10(6), 349–356.
- Lastayo, P., Woolf, J., Lewek, M., Snyder-Mackler, L., Reich, T. & Lindstedt, S. (2003). Eccentric muscle contractions: Their contribution to injury, prevention, rehabilitation, and sport. *Journal of Orthopedic & Sport Physical Therapy*, 33, 557-571.
- Lau, W., Muthalib, M. & Nosaka, K. (2013). Visual Analog scale and pressure pain threshold for delayed onset muscle soreness assessment. *Journal of musculoskeletal pain*, 21(4), 320-326.
- Lieber, R. & Fridén, J. (1999). Mechanisms of muscle injury after eccentric contraction. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2(3), 253-265.
- Lindstedt, S., Lastayo, P. & Reich, T. (2001). When active muscles lengthen: properties and consequences of eccentric contractions. *News Physiol. Sci*, 16, 256-26.
- Loe, H., Rognmo, O., Saltin, B. & Wisløff, U. (2013). Aerobic Capacity Healthy Men and Women 20–90 Years. *PLoS One*, 8(5), e64319.
- Luyckx, T., Didden, K., Vandenuecker, H., Labey, L., Innocenti, B. & Bellemans, J. (2008). Is there a biomechanical explanation for anterior knee pain in patients with patella alta?. *The journal of bone and joint surgery*, 91, 344-350.
- McHugh, M. & Pasiakos, S. (2004). The role of exercising muscle length in the protective adaptation to a single bout of eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*, 92, 286-293.
- Morgan, D. & Allen, D. (2006). Early events in stretch-induced muscle damage. *American Physiological Society*, 87, 2007-2015.

- Murase, S., Terazawa, E., Queme, F., Ota, H., Matsuda, T., Hirate, K., Kozaki, Y., Katanosaka, K., Taguchi, T., Urai, H., Mizumura, K. (2010). Bradykinin and nerve growth factor play pivotal roles in muscular mechanical hyperalgesia after exercise (delayed-onset muscle soreness). *J Neurosci*, 30, 3752–3761.
- Newham, D., Jones, D., Ghosh, G. & Aurora, P. (1988). Muscle fatigue and pain after eccentric contractions at long and short length. *Clinical Science*, 74, 553-557.
- Nikolajsen, L., Kristensen, A., Pedersen, L., Rahbek, O., Jensen, T. & Møller-Madsen, B. (2011). Intra- and interrater agreement of pressure pain thresholds in children with orthopedic disorders. *Journal of Children's Orthopaedics*, 5(3), 173–178.
- Norrbrand, L., Pozzo, M., Tesch, P. (2008). Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. *Eur J Appl Physiol*, 102, 271–281.
- Nosaka, K., Newton, M. J. & Sacco, P. (2005). Attenuation of protective effect against eccentric exercise-induced muscle damage. *Can J Appl Physiol*, 30(5), 529-542.
- Nosaka, K., Sakamoto, K., Newton, M. & Sacco, P. (2001). How long does the protective effect on eccentric exercise-induced muscle damage last? *Med Sci Sports Exerc*, 33(9), 1490-5.
- Penailillo, L., Blazeovich, A., Numazawa, H., Nosaka, K. (2013). Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 45(9), 1773-81.
- Penailillo, L., Blazeovich, A., Nosaka, K. (2014). Energy expenditure and substrate oxidation during and after eccentric cycling. *Eur J Appl Physiol*, 114, 805-814.
- Pozo, P. (2010). El tipo de trabajo muscular y su influencia en la función. *Revista digital- Buenos Aires*, 14, 142.
- Proske, U. & Morgan, D. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: Mechanism, mechanical signs, adaptations and clinical applications. *Journal of physiology*, 537(2), 333-345.
- Puebla, F. (2005). Tipos de dolor y escala terapéutica del O.M.S. Dolor iatrogénico. *Oncología (Barc.)*, 28, 3.
- Rezaei, M. & Ebrahimi-Takamjani, I. (2014). Effect of eccentric exercise-induced muscle damage on electromyographic activity of quadriceps in untrained healthy females. *Med J Islam Repub Iran*, 28, 154.

- Rodriguez-Casares, R., Aguado, X. & Alegre, L. (2012). Ejercicio excéntrico de baja intensidad y daño muscular en mujeres jóvenes. Un estudio piloto. *Rev. Cultura Ciencia Deporte*, 7, 25-34.
- Rubio-Sobrino, P., Rodríguez-Casares, R., Aguado, X., Alegre, L. (2012). Ángulo óptimo articular y ejercicio: bases y aplicaciones. *Apunts. Educación Física y Deportes*, 109, 65-72.
- Saka, T., Akova, B., Yazici, Z., Sekir, U., Gür, H. & Ozarda, Y. (2009). Difference in the magnitude of muscle damage between elbow flexors and knee extensors eccentric exercises. *Journal of Sports Science and Medicine*, 8, 107-115.
- Schappacher-Tilp, G., Leonard, T., Desch, G. & Herzog, W. (2015). A Novel Three-Filament Model of Force Generation in Eccentric Contraction of Skeletal Muscle. *PLoS One*, 10(3), e0117634.
- Scott, K., Rozenek, R., Crussemeyer, H. & Lacourse, M. (2003). Effects of delayed onset muscles soreness on selected physiological responses to submaximal running. *J. Strength Cond. Res*, 17, 4, 652-658.
- Taguchi, T., Sato, J. & Mizumura, K. (2005). Augmented Mechanical Response of Muscle Thin-Fiber Sensory Receptors Recorded from Rat Muscle–Nerve Preparations In Vitro After Eccentric Contraction. *Journal of Neurophysiology Published*, 94, 4, 2822-2831.
- Tidball, J. (2011). Mechanism of muscle injury, repair and regeneration. *American Physiological Society*, 1, 2029-2062.
- Upadhyay, C., Cameron, K., Murphy, L., & Battistella, M. (2014). Measuring pain in patients undergoing hemodialysis: a review of pain assessment tools. *Clin Kidney J*, 4, 367-372
- Westing, S., Cresswell, A. & Thorstensson, A. (1991). Muscle activation during maximal voluntary eccentric and concentric knee extensión. *Eur J Appl Physiol*, 62,104-108
- Williams, D., Salcedo, M., Irving, T., Regnier, M., & Daniel, T. (2013). The length–tension curve in muscle depends on lattice spacing. *Proc Biol Sci*, 280, 1-7
- Winger, A., Kvarstein, G., Wyller, V. (2014). Pain and pressure pain thresholds in adolescents with chronic fatigue syndrome and healthy controls: a cross-sectional study. *BMJ Open*, 4, e005920.

Yu, J.-G., Liu, J.-X., Carlsson, L., Thornell, L.-E., & Stål, P. S. (2013). Re-Evaluation of Sarcolemma Injury and Muscle Swelling in Human Skeletal Muscles after Eccentric Exercise. PLoS ONE, 8(4), e62056.

Anexos

Anexo N°1

Consentimiento informado

CARTA DE INFORMACIÓN AL PARTICIPANTE DE ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN DE TESIS

Este Formulario de Consentimiento Informado se dirige a hombres que se les invita a participar en la investigación de tesis “Comparación del daño muscular inducido por ejercicio en bicicleta excéntrica realizado a larga y corta longitud muscular en sujetos jóvenes sanos”

Investigadores:

Candidatos a título: Carolina Aedo (caedom@uft.edu)

Mayari Cartagena (mcartagenac@uft.edu)

Alejandra Contreras (acontrerasg@uft.edu)

Profesor Guía: Dr. Luis Peñailillo (lpenailillo@uft.cl)

Sede donde se realiza la investigación: Laboratorio de Investigación en Salud de la Facultad de Medicina, Universidad Finis Terrae (Av. Pedro de Valdivia # 1590 Providencia, Santiago).

Los investigadores de este estudio, lo invitan a participar del proyecto “Comparación del daño muscular inducido por ejercicio en bicicleta excéntrica realizado a larga y corta longitud muscular en sujetos jóvenes sanos”, y les brindaremos información acerca de éste. Permítanos informarle acerca del proyecto de investigación, que usted pueda hacer preguntas y aclarar sus dudas, y luego decida si desea o no participar. Luego de que haya decidido participar, se le solicitará que firme un consentimiento que se le presentará a continuación, del cual usted obtendrá una copia.

El propósito de este estudio es comparar el daño muscular a corta y larga longitud muscular, luego de un protocolo de ejercicio excéntrico.

Intervención:

- Primera sesión de información al participante, firma del consentimiento y toma de antecedentes personales, además de la evaluación de la potencia concéntrica en la bicicleta concéntrica
- Segunda sesión consiste en la evaluación de fuerza isométrica máxima voluntaria y dolor, además de la sesión de trabajo en la bicicleta excéntrica
- Al día siguiente, a las 48 y 72 hrs, se evaluará nuevamente la fuerza y el dolor muscular

Todas las sesiones se realizan de lunes a viernes, en horario 15:00 – 20:00, según conveniencia del participante.

Riesgos: El mayor riesgo asociado a la participación en el estudio, es que se pueden generar lesiones debido al entrenamiento en bicicleta concéntrica o excéntrica o en la plataforma de fuerza, lo cual es poco probable.

Es probable que presente molestias de tipo dolor muscular a partir del día siguiente al entrenamiento excéntrico.

Tener en cuenta:

- La participación en el estudio es voluntaria
- Los datos obtenidos del paciente serán confidenciales
- Para asegurar la participación debe estar firmado el consentimiento informado, el cual usted puede decidir firmar o no libremente.
- Usted no deberá realizar gastos en esta intervención, ni recibirá remuneración por participar en esta
- Si tiene preguntas luego de iniciado el estudio, puede realizarlas a cualquiera de los investigadores del estudio

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

He leído la información proporcionada o me ha sido leída. He tenido la oportunidad de preguntar sobre ella y se me ha contestado satisfactoriamente las preguntas que he realizado. Consiento voluntariamente participar en esta investigación como participante y entiendo que tengo el derecho de retirarme de la investigación en cualquier momento sin que me afecte en ninguna manera.

Nombre del Participante _____

Firma del Participante _____

Fecha _____

He leído con exactitud o he sido testigo de la lectura exacta del documento de consentimiento informado para el potencial participante y el individuo ha tenido la oportunidad de hacer preguntas. Confirmando que el individuo ha dado consentimiento libremente.

Nombre del Investigador 1) _____

Firma del Investigador _____

Nombre del Investigador 2) _____

Firma del Investigador _____

Nombre del Investigador 3) _____

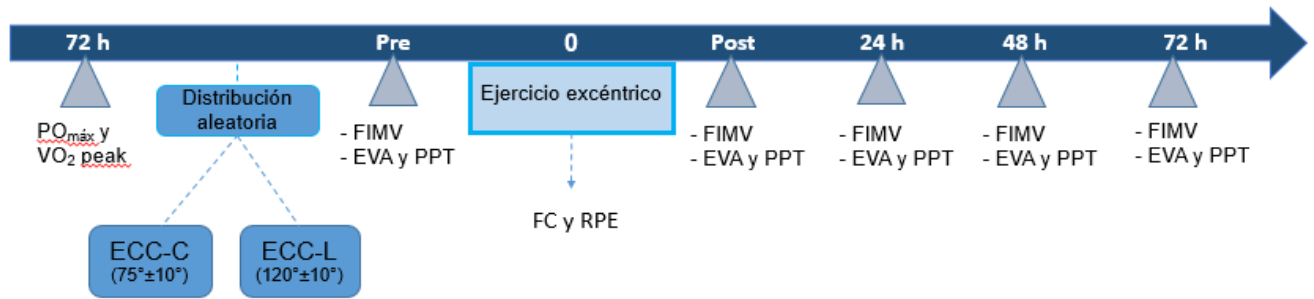
Firma del Investigador _____

Fecha _____

Ha sido proporcionada al participante una copia de este documento de Consentimiento Informado _____ (iniciales del investigador/asistente)

Anexo N°2

Diseño experimental



Anexo N°3

Hoja de recopilación de datos

FICHA

Nombre:

Código:

Edad:

Fecha de Nac.:

Masa corporal:

Talla:

Grupo de estudio:

ECC-L

ECC-C

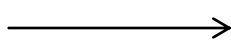
EVALUACIÓN CICLOERGÓMETRO CONCÉNTRICO

Código:

Fecha:

Carga (W)	Tiempo (min)	FC (lat./min)	VO2 (ml/min/Kg)	VO2 (L/min)
50 W	4			
75 W	1			
100 W	1			
125 W	1			
150 W	1			
175 W	1			
200 W	1			
225 W	1			
250 W	1			
275 W	1			
300 W	1			
325 W	1			
350 W	1			

PO_{MÁX} CON:



80%

FC máx:

FC máx. Teórica:

VO2 peak:

Asiento:

CICLOERGÓMETRO EXCÉNTRICO

Código:

Fecha:

	15'	30'	Final
Average power			
RPE			

	1'	5'	10'	15'	20'	25'	30'
FC							

FUERZA ISOMÉTRICA MÁXIMA VOLUNTARIA

Código:

Fecha:

	1er intento	2do intento	3er intento	Final
Pre ECC				
Post ECC				
24h				
48h				
72h				

DOLOR

Código:

Fecha:

PPT	Pre ECC			Post ECC			24h			48h			72h		
Recto Femoral															
Vasto medial															
Vasto lateral															

Caminar (3 metros)

	Pre ECC	Post ECC	24 h	48h	72h
EVA					

Sentarse y pararse (5 veces)

	Pre ECC	Post ECC	24 h	48h	72h
EVA					

Subir y bajar escaleras (5 peldaños)

	Pre ECC	Post ECC	24 h	48h	72h
EVA					

EVALUACIÓN DEL DOLOR

Código:

Fecha:

Pre ECC:

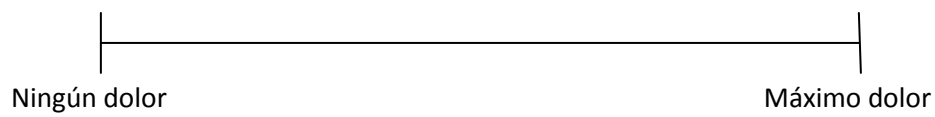
Post ECC:

24 hrs:

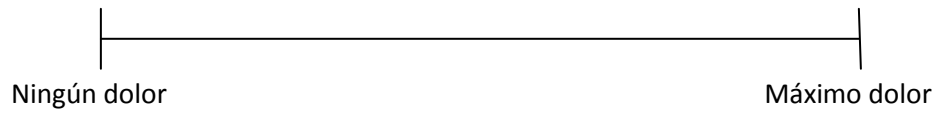
48 hrs:

72 hrs:

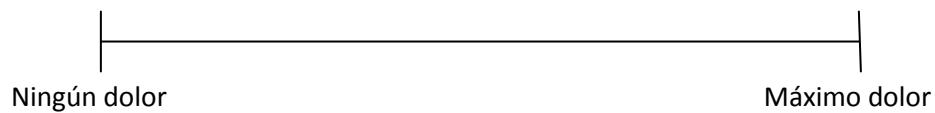
Caminar



Sentarse y pararse



Subir y bajar escaleras



Anexo N°3

Escala de Borg

Escala de Borg RPE:
¿Cómo te ha resultado la sesión de hoy?

6

7

8 MUY MUY LIGERA

9 MUY LIGERA

10

11 LIGERA

12

13 ALGO DURA

14

15 DURA (pesada)

16

17 MUY DURA

18

19 EXTREMADAMENTE DURA

20 MÁXIMO ESFUERZO POSIBLE

Anexo N°4

Prueba VO₂máx

WATTS	NIVEL	RPM
50 W	1	50
75 W	3	63 – 65
100 W	6	64 – 66
125 W	8	60 – 63
150 W	11	62 – 64
175 W	12	60 – 63
200 W	13	60 – 63
225 W	14	65 – 68
250 W	16	64
275 W	19	60 – 63
300 W	20	61 – 63
325 W	20	70
350 W	20	72 – 75