



UNIVERSIDAD FINIS TERRAE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE KINESIOLOGÍA

**DIFERENCIAS EN EL DAÑO MUSCULAR Y ESTRÉS
METABÓLICO ENTRE LOS MÚSCULOS EXTENSORES Y
FLEXORES DE RODILLA INDUCIDOS POR UN EJERCICIO EN
CICLOERGÓMETRO EXCÉNTRICO**

JOSÉ IGNACIO CANGAS SEIBA
NICOLÁS FELIPE GUZMÁN WEBER

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 Escárate

Santiago, Chile

2014

José Cangas S.

Nicolás Guzmán W.

Dr. Luis Peñailillo Escárte

Dedicatoria

Esta tesis se la queremos dedicar a nuestras familias, amigos, compañeros y profesores, ya que sin el apoyo de ellos no hubiera sido posible lograr este paso tan importante para poder sacar adelante nuestra carrera. Siempre estuvieron dándonos consejos, apoyo y regalándonos un poco de su tiempo independiente de la situación en que nos encontremos por lo que valoramos mucho eso de parte de todos Uds.

Agradecimientos

Queremos agradecer principalmente a nuestro profesor guía Luis Peñailillo por tener siempre, durante este largo proceso, la mejor disposición para ayudarnos, por estar siempre presente y junto al profesor Herman Zbinden permitirnos utilizar el laboratorio entregándonos todas las facilidades y así, permitir que esta tesis sea posible.

También agradecer a nuestro círculo cercano, ya sea familiares y amigos, por siempre estar presentes y dándonos palabras de apoyo en este periodo que a pesar de todas las dificultades que se nos presentaron siempre creyeron en nosotros y tuvieron la disposición de ayudar.

Agradecer también a los participantes en nuestra tesis, destacando que fueron voluntarios y que siempre mostraron gran compromiso, con la disposición de ayudar y trabajar de manera correcta, muchas veces realizando grandes esfuerzos para poder llegar a las sesiones de evaluación pactadas.

Por último, una mención a la Universidad y cuerpo docente por los conocimientos entregados durante estos 5 años ya que sin todos ellos todo esto no hubiera sido posible.

Índice de contenidos

| | |
|--|------|
| Índice de ilustraciones y tablas..... | vi |
| Resumen..... | vii |
| Abstract..... | viii |
| Abreviaturas..... | ix |
| Introducción..... | 1 |
| Capítulo 1: Marco teórico..... | 4 |
| i. Pregunta de investigación..... | 17 |
| ii. Hipótesis..... | 17 |
| iii. Objetivo general | 18 |
| iv. Objetivos específicos..... | 18 |
| Capítulo 2: Materiales y métodos..... | 19 |
| b. Diseño de investigación..... | 19 |
| c. Universo, población y muestra..... | 19 |
| d. Criterios de inclusión y exclusión..... | 20 |
| e. Metodología..... | 21 |
| f. Variables del estudio..... | 30 |
| g. Análisis estadístico..... | 33 |
| Capítulo 3: Resultados..... | 34 |
| Capítulo 4: Discusión..... | 43 |
| Conclusión..... | 51 |
| Limitaciones..... | 52 |
| Bibliografía..... | 53 |
| Anexos..... | 62 |

Índice de Ilustraciones y Tablas

- Figura 1** Cicloergómetro excéntrico
- Figura 2** Eccentric Trainer, Metitur.
- Figura 3** Escala de Borg 6-20
- Figura 4** Salto vertical en plataforma TESys 1000, Globus
- Figura 5** Pruebas de flexibilidad: AKE
- Figura 6** Pruebas de flexibilidad: SLR
- Figura 7** Pruebas de flexibilidad: THOMAS
- Figura 8** Pruebas de flexibilidad: Sit and Reach
- Figura 9** Algómetro Force One FDIX, Wagner, USA
- Figura 10** Resultados parámetros metabólicos
- Figura 11** Resultados saltos CMJ y SJ
- Figura 12** Resultados EVA
- Figura 13** Resultados PPT
- Figura 14** Resultados rigidez muscular

Resumen

El ejercicio en cicloergómetro excéntrico es una modalidad de entrenamiento que puede generar múltiples beneficios en la salud, tanto en sujetos sanos y en diferentes poblaciones clínicas, a un menor costo metabólico que otras modalidades de entrenamiento. La desventaja que tiene el ejercicio excéntrico es el daño muscular inducido por ejercicio que produce una reducción de la fuerza y performance muscular de forma aguda. Estas variables solo han sido estudiadas para musculatura extensora de rodilla, por lo que este estudio será el primero en medir el comportamiento de la musculatura flexora de rodilla frente a una sesión en el cicloergómetro excéntrico. **Participantes y métodos.** 10 hombres sedentarios sanos fueron sometidos a 2 sesiones de 30 minutos en cicloergómetro excéntrico, una para cuádriceps (EXT) y otra para isquiotibiales (FLEX) con 2 semanas de diferencia entre ellas. Se realizaron evaluaciones Pre, Post y durante los días 1-4 posteriores a cada sesión del cicloergómetro, comparando los resultados entre ambas sesiones. Las evaluaciones fueron de $VO_{2máx}$, FC, RPE, pruebas de salto, dolor y rigidez muscular. **Resultados.** El VO_2 , FC y RPE fueron menores ($P<0.05$) en la sesión enfocada para EXT en comparación a la de FLEX. No hubo diferencias significativas entre grupos para las variables de daño muscular de salto vertical y PPT. La rigidez muscular se vio aumentada para ambos grupos sin diferencias significativas. **Conclusión.** El cicloergómetro excéntrico fue metabólicamente menos demandante para los EXT en comparación a los FLEX. El daño muscular fue similar para ambos grupos, por lo que no estaría contraindicado utilizar esta modalidad de entrenamiento para la musculatura isquiotibial.

Palabras clave. Cicloergómetro excéntrico, Gasto metabólico, Daño muscular inducido por ejercicio, Isquiotibiales.

Abstract

The eccentric cycle ergometer exercise is a form of training that can generate multiple health benefits, both in healthy subjects and in different clinical populations, at a lower metabolic cost than other forms of training. The disadvantage is the eccentric exercise-induced muscle damage that produces a reduction in muscle strength and performance acutely. These variables have been studied only for knee extensor muscles, so this study is the first to measure the performance of the knee flexors with one bout in the eccentric ergometer.

Participants and methods. 10 healthy sedentary men underwent 2 sessions of 30 minutes in the eccentric ergometer, one for quads (EXT) and one for hamstrings (FLEX) with 2 weeks apart between them. Assessments were performed Pre, Post and during days 1-4 after each cycling session, comparing the results between the two sessions. Evaluations were VO₂max, HR, RPE, show jumping, muscle pain and stiffness. **Results.** The VO₂, HR and RPE were lower ($P < 0.05$) in session focused EXT compared to the FLEX. There were no significant differences between groups for the variables of muscle damage, PPT and vertical jump. Muscle stiffness was increased for both groups without significant differences. **Conclusion.** The eccentric cycle ergometer was metabolically less demanding for EXT compared to FLEX. Muscle damage was similar for both groups, so it would not be contraindicated to use this type of training for the hamstrings.

Keywords. Eccentric ergometer, metabolic expenditure, exercise-induced muscle damage, Hamstrings.

Abreviaturas

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| ANOVA | Análisis de la varianza |
| AKE | Prueba de extensión activa de rodilla |
| BF | Bíceps femoral |
| CMJ | Salto contra movimiento |
| CK | Creatin kinasa |
| DMIE | Daño muscular inducido por ejercicio |
| DOMS | Dolor muscular de aparición tardía |
| EIAS | Espina iliaca anterosuperior |
| EVA | Escala visual análoga |
| EXT | Extensores |
| FC | Frecuencia cardiaca |
| FLEX | Flexores |
| IL-1 | Interleukina-1 |
| LDH | Lactato deshidrogenasa |
| Mb | Mioglobina |
| N | Newton |
| PO_{máx} | Potencia máxima concéntrica |
| PPT | Umbral del dolor a la presión |

| | |
|---------------------------|------------------------------|
| RF | Recto femoral |
| ROM | Rango de movimiento |
| RPE | Índice de esfuerzo percibido |
| RPM | Revoluciones por minuto |
| SD | Desviación estándar |
| SJ | Salto squat |
| SLR | Prueba Straight leg raise |
| SR | Prueba Sit and reach |
| ST | Semitendinoso |
| VL | Vasto lateral |
| VM | Vasto medial |
| VO₂ | Consumo de oxígeno |
| VO_{2máx} | Consumo máximo de oxígeno |
| VO_{2peak} | Consumo peak de oxígeno |
| W | Watt |

Introducción

Es conocido que los beneficios del ejercicio físico son múltiples. Hoy en día la búsqueda se centra en encontrar la modalidad de ejercicio más completa y eficiente para la población con el fin de mejorar su salud o rendimiento deportivo en la población general y deportistas, respectivamente. El ejercicio es posible llevarlo a cabo gracias a las contracciones musculares, las cuales se clasifican en isométricas, donde no existe movimiento articular, concéntricas donde existe un acercamiento de las extremidades y excéntricas en donde las extremidades se alejan bajo tensión lo que permite un alargamiento del músculo (4). Como lo dice su nombre, el ejercicio excéntrico se basa en favorecer la contracción muscular excéntrica, ya sea en conjunto con la contracción concéntrica o el uso exclusivo de la contracción excéntrica. El ejercicio excéntrico ha demostrado múltiples características benéficas, como la capacidad de generar la misma o más fuerza muscular a un menor gasto metabólico en comparación al ejercicio concéntrico (1-3) o dicho en otras palabras, tiene la capacidad de generar mayor fuerza a un mismo gasto metabólico. Dentro de las modalidades para favorecer el ejercicio excéntrico encontramos por ejemplo el descenso de pesos libres (5), trote o caminata cuesta abajo (6), ejercicios nórdico para isquiotibiales (7), el ejercicio de musculación peso muerto (8) y el cicloergómetro excéntrico (9, 10), entre otros. El cicloergómetro excéntrico es una de las modalidades más novedosas y ha mostrado resultados positivos en poblaciones clínicas, rehabilitación kinésica y acondicionamiento deportivo. Así, programas de entrenamiento basados exclusivamente en el cicloergómetro excéntrico han logrado generar aumentos en la fuerza y masa muscular (2, 10, 11) con la característica de realizar el ejercicio a un menor gasto metabólico en comparación de modalidades concéntricas (1, 3).

Uno de los posibles efectos negativos que se pueden presentar con el ejercicio excéntrico es el daño muscular inducido por contracciones excéntricas.

Este daño se manifiesta generalmente posterior a una primera sesión de ejercicio a la cual no se esté acostumbrado, ya sea por ser la primera vez o por un gran incremento en la intensidad de la sesión de entrenamiento en relación a la sesión previa del ejercicio (12-14). Sin embargo, cabe destacar que el daño producido disminuye significativamente, pudiendo ser casi insignificante al repetir el mismo ejercicio excéntrico en una segunda sesión, esto debido al fenómeno de adaptación conocido como el efecto de dosis repetidas (3, 15, 16).

El cicloergómetro excéntrico solo ha sido utilizado para trabajar principalmente el grupo muscular extensor de rodilla haciendo que los pedales giren en sentido posterior, teniendo que resistir con este grupo muscular el empuje de los pedales (3, 9, 10). Es este hecho el que llama nuestra atención, ya que sería importante saber las consecuencias que se pudiesen encontrar si el ejercicio excéntrico fuera realizado por el grupo flexor de rodilla, es decir, cambiando el sentido de giro de los pedales hacia anterior. Sería interesante estudiar cual es el comportamiento de este grupo muscular tomando como referencia lo ya estudiado en el grupo extensor de rodilla, en cuanto al daño muscular y gasto metabólico que se produciría si se trabaja a la misma intensidad que un ejercicio enfocado a los extensores de rodilla. Teniendo en cuenta que los isquiotibiales son músculos con una alta incidencia de lesiones (12 - 16%) y además presentan una de las tasas más altas de reincidencia (22 - 36%) (17-19), una herramienta como el cicloergómetro excéntrico sería muy útil para su pronta rehabilitación, fortalecimiento y prevención. De esta forma evitar los días de ausencia que se producen a causa de las lesiones en el caso de los deportistas. Esto podría aportar nueva evidencia para proporcionar una rehabilitación más completa, o nuevos métodos preventivos para lesiones musculares principalmente en el grupo flexor de rodilla o como base para futuros estudios sobre el daño muscular en este grupo muscular.

Tomando en cuenta los principales factores de riesgo y mecanismos de lesión que presenta dicho grupo muscular, como por ejemplo: la debilidad muscular y los beneficios que tiene el ejercicio excéntrico en relación a otro tipo de

ejercicios como el concéntrico o isométrico en cuanto al aumento de fuerza y masa muscular (20), este estudio podría ser un aporte como un nuevo método de entrenamiento para disminuir la incidencia y reincidencia de lesiones musculares ya sea como método preventivo o tratamiento.

Capítulo 1: Marco Teórico

Ejercicio excéntrico

En el año 1952, A. V. Hill (4) describió dos tipos de contracción muscular, las isométricas y las isotónicas. Mientras Hill describió que las contracciones isométricas son aquellas donde el músculo se contrae sin cambiar su longitud, en las contracciones isotónicas, el músculo mantiene una tensión constante y este va variando su longitud a lo largo del rango de movimiento. En esta última categoría, se describen dos tipos de contracción: la concéntrica y la excéntrica. Durante la primera, la tensión generada por el músculo es mayor a la fuerza que se le opone, ocasionando el acortamiento de este (produciendo trabajo positivo). Mientras que en la contracción excéntrica, la resistencia es mayor a la fuerza que genera el músculo, por lo que este se alarga a medida que genera tensión, generalmente usado como un freno a la acción muscular, absorbiendo energía (trabajo negativo) (21). Las contracciones excéntricas las realizamos diariamente en distintas actividades, como por ejemplo al bajar escaleras o sentarse en un silla, en donde su principal función es frenar/desacelerar el movimiento de un segmento corporal.

En los últimos años, el ejercicio excéntrico ha sido estudiado comparando sus efectos en relación al ejercicio concéntrico, en el cual los estudios han evidenciado aumentos en la fuerza muscular (2) y en la masa muscular de extremidades inferiores (2, 9, 22) durante entrenamientos enfocados en el entrenamiento excéntrico, los cuales podrían ser muy requeridos en distintas poblaciones clínicas, deportivas y en rehabilitación traumatológica.

Beneficios del entrenamiento del ejercicio excéntrico

El ejercicio excéntrico tiene la capacidad de generar un estímulo en el sistema muscular a un menor costo metabólico en relación al ejercicio concéntrico (3). Esto lo hace muy llamativo para incluirlo en programas de entrenamiento y/o rehabilitación en busca del aumento de fuerza y masa muscular, ya que se ha demostrado que este tipo de entrenamiento ha sido efectivo para aumentar en un 26% la fuerza muscular y ganancias de un 52% en masa muscular después de un programa de entrenamiento de ocho semanas, en donde por el contrario el ejercicio concéntrico no evidenció cambios significativos (10). Un estudio realizado por Gerber y cols (22) en rehabilitación postquirúrgica de ligamento cruzado anterior, la cual fue realizada por el mismo cirujano y el tipo de injerto dependía de la elección de cada paciente, el cual podía ser hueso-tendón-hueso o semitendinoso-gracilis. Se formaron dos grupos de manera aleatoria, uno realizó un programa de rehabilitación mediante cicloergómetro excéntrico comenzando a la tercera semana postquirúrgica con una duración de 12 semanas y el otro grupo realizó un programa de rehabilitación kinésica estándar. Luego de un año de seguimiento se encontró un incremento en el volumen muscular de un 23,3% en cuádriceps y 20,6% en glúteo mayor en el grupo excéntrico y de un 13,4% y 11,6% respectivamente, en el grupo estándar. También reportaron aumentos significativos en la fuerza muscular donde hubo un incremento de un 33% para el grupo excéntrico y de un 9% para el grupo estándar.

Ejercicio excéntrico en condiciones patológicas

Uno de los puntos importantes que el ejercicio excéntrico tenga un bajo costo metabólico, es su efectividad en personas que no puedan soportar la demanda metabólica de un ejercicio de leve o moderada intensidad (23, 24). Así, el ejercicio excéntrico, otorga una alternativa para que pacientes con condiciones patológicas puedan realizar ejercicio sin mayores complicaciones, las que se pudiesen exacerbar con el ejercicio concéntrico. Esto podría generar grandes

beneficios para los pacientes logrando progresar con seguridad durante varias semanas de entrenamiento, logrando una mejor calidad de vida. Dentro de estas poblaciones especiales están los adultos mayores, ya que a medida que avanzan los años, el cuerpo humano se vuelve más frágil por una pérdida de masa muscular, fenómeno llamado sarcopenia, que lleva a una pérdida en la fuerza y un deterioro progresivo en la función neuromuscular (25), teniendo como consecuencias un aumento en el riesgo de caídas y morbilidades en los adultos mayores (26). El ejercicio excéntrico retarda en cierta medida estos sucesos, logrando aumento en la fuerza, masa muscular y balance, disminuyendo en el riesgo de caídas (2, 11). El cáncer también es una condición favorecida por el ejercicio excéntrico ya que el tratamiento de esta enfermedad puede ocasionar una reducción en la calidad de vida por una pérdida en las habilidades musculares y un posible déficit en la movilidad. El ejercicio excéntrico mejora este déficit con un bajo costo metabólico, por lo que es bien tolerado por los pacientes (11). Los pacientes con alteraciones neurológicas del sistema nervioso central o periférico sufren pérdida de fuerza muscular y atrofia del músculo llevando al adulto mayor a perder movilidad, lo que puede verse contrarrestado a través del ejercicio excéntrico (11). También, en pacientes con alteraciones metabólicas como la diabetes mellitus tipo 2, el ejercicio excéntrico en cicloergómetro adicional a un programa de entrenamiento aeróbico mejora la tolerancia a la glucosa y la disminución de los valores de hemoglobina glucosilada. Además, este tipo de ejercicio aumenta la tasa metabólica basal lo que presumiblemente aumenta la absorción absoluta de glucosa (26). Hay que tener en cuenta el realizar una fase adaptativa en un principio para así evitar el daño muscular innecesario y la posibilidad de reacciones adversas, como dolor muscular o rabdomiólisis en el peor de los casos (11). Esta fase adaptativa consiste en un aumento gradual de la carga excéntrica (intensidad) sin aumentos bruscos, ya sea la primera sesión o entre dos de ellas.

Daño muscular

Luego de actividad física o ejercicio al cual no se está acostumbrado es muy probable manifestar alguna sensación de dolor o malestar los días posteriores de haber realizado dicha actividad, esto se conoce como el daño muscular inducido por ejercicio (DMIE) (25, 26). Este daño es de mayor magnitud en el ejercicio excéntrico en relación al concéntrico (3, 27), manifestándose a través de la disminución de fuerza y funcionalidad muscular (16, 26), rango de movimiento (ROM) y aumento de proteínas específicas musculares como la creatin kinasa (CK) y mioglobina (Mb) (12), además de lactato deshidrogenasa (LDH) (28, 29). Sin embargo, el síntoma más reconocible que queda en manifiesto es el dolor muscular de aparición tardía (siglas en inglés: DOMS) (3, 13).

Características del daño muscular

DOMS. El DOMS es una sensación de disconfort o dolor como respuesta a una sesión de entrenamiento a la cual no se está acostumbrado, es decir, una sesión de ejercicio realizada por primera vez o un incremento sustancial en la carga de entrenamiento (30). Esta sensación de dolor comienza entre las 8-24 horas posteriores de haber realizado el ejercicio, presentando un peak de intensidad entre las 24-72 horas. Sin embargo, el DOMS desaparece aproximadamente después del quinto día de haber realizado el ejercicio (31). El DOMS ha sido medido históricamente a través de la escala visual análoga (EVA), escala de 100 mm donde el sujeto traza una línea según su percepción del dolor, siendo 0 sin dolor y 100 el mayor dolor percibido siempre (32).

El DOMS se asocia a microtraumas del tejido conectivo y contráctil muscular, lo que genera liberación de proteínas musculares específicas y un consecuente aumento en la presión osmótica junto con la llegada de mediadores inflamatorios a la zona. El resultado es un edema que genera aumento en el impacto mecánico de las terminaciones nerviosas libres, las que generan la sensación de dolor. El DOMS es de mayor magnitud después de un trabajo

excéntrico comparado al entrenamiento concéntrico (14). Es importante señalar que el DOMS no genera impotencia funcional por lo que no inhabilita la realización de un ejercicio cuando está presente, pero el riesgo de lesión es mayor ya que las fibras musculares se encuentran dañadas y con una menor capacidad de generar fuerza (31).

Disminución de la función muscular. Uno de los efectos adversos agudos más importantes del ejercicio excéntrico es la disminución de fuerza muscular que se evidencia a las horas después de haber realizado este ejercicio. En un estudio realizado por Allen y cols (33), se evidenció que un músculo estimulado a una alta frecuencia (50 Hz) y de forma excéntrica, tiene un descenso de aproximadamente un 30% de fuerza excéntrica en comparación a un músculo estimulado de forma concéntrica y a la misma frecuencia, donde solo 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 demora más de 24 horas en volver a su estado previo al ejercicio. Una explicación por la cual se producen estos síntomas es que el ejercicio excéntrico produce una disrupción del sarcolema y por ende se desencadenan respuestas inflamatorias a nivel muscular (34), 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 (33). Esta es una de las teorías, llamada “falta de homogeneidad del sarcómero”, que se ha propuesto respecto a la pérdida de fuerza, ya que aún no está claro el mecanismo exacto que la produce (25). Las otras teorías son, una falla en el acoplamiento excitación-contracción y alteración en los elementos del citoesqueleto, como la titina, nebulina, desmina y destrofina (33). Cabe destacar que el DMIE se produce mayormente durante la primera sesión de trabajo excéntrico como respuesta a un fenómeno de daño muscular agudo, el cual es prácticamente inexistente al repetir el ejercicio subsecuentemente. Por ejemplo, en el estudio realizado por Peñailillo y cols (3), 10 sujetos realizaron dos sesiones de cicloergómetro excéntrico con dos semanas

de desfase entre ellas. Cada sesión tuvo una duración de 30 minutos al 60% de la potencia máxima concéntrica. Luego de las sesiones se les midió la fuerza isométrica voluntaria máxima, altura de salto y DOMS, arrojando que posterior a la segunda sesión los cambios en estas variables fueron mínimos. Esta adaptación se conoce como el “efecto de dosis repetidas” (3, 12, 16).

Rigidez Muscular. Dentro de las características del DMIE, la rigidez o stiffness muscular es otro marcador indirecto que refleja el daño causado por un ejercicio intenso. La rigidez muscular ha sido evaluada a través de la pérdida cuantificable del ROM, antes y después de realizar un ejercicio excéntrico (35). La rigidez muscular se comporta de manera similar al dolor muscular inducido por ejercicio excéntrico, en donde las mayores pérdidas de ROM se reportan dentro de las primeras 48 horas (36) y no vuelven a la normalidad en algunos casos hasta los cuatro días post-ejercicio (37). La rigidez en si no tiene una causa específica, más bien es el conjunto de varios procesos que ocurren tras un ejercicio demandante, entre ellas: la ruptura de miofibrillas musculares, el edema post-ejercicio y el propio dolor al alargamiento muscular que limitan de algún modo la excursión articular, limitando el ROM. De estos últimos sucesos, el edema como causa de rigidez pasiva se ha descartado debido a que el peak de inflamación post-ejercicio se encuentra cerca del quinto día, lejos del peak de mayor pérdida de ROM que se encuentra 24-48 horas post-ejercicio (35). La rigidez muscular altera la función muscular los días posteriores al haber realizado un ejercicio demandante, por lo que el conocer este fenómeno es de suma importancia, ya que en los últimos años se ha postulado que sujetos más flexibles o menos rígidos son menos susceptibles al daño muscular inducido por ejercicio (38, 39). Es importante señalar que al igual que el dolor muscular y otras características del DMIE generado por ejercicio excéntrico, la rigidez muscular se ve menos afectada desde la segunda sesión de entrenamiento excéntrico (40). Es interesante conocer esto para la rehabilitación ya que los efectos negativos se van atenuando sesión a sesión y no son un impedimento para un posible tratamiento.

Proteínas musculares específicas. El ejercicio excéntrico realizado por primera vez produce un daño muscular y también un proceso inflamación, lo que lleva a una alteración en los niveles de actividad de algunas proteínas específicas. Las que ven aumentado sus niveles en sangre son la CK, Mb, LDH, interleukina-1 (IL-1) y factores de crecimiento. La CK ve aumentado sus niveles en sangre un 33% a las tres horas posterior al ejercicio, con un peak entre las 24 y 48 horas (41), volviendo a niveles normales al noveno día en sujetos no entrenados (42). La Mb se comporta de forma similar a la CK, aumentando su nivel inmediatamente posterior al ejercicio excéntrico, registrándose un aumento en su concentración los 5 días posteriores al ejercicio excéntrico. Los niveles de actividad de LDH se ven aumentados luego del ejercicio excéntrico y al igual que la Mb, se vio que este aumento se mantiene hasta el quinto día (12). Otra proteína que se ve afectada es la IL-1, la cual aumenta en niveles significativos, que se pueden observar a las 3 horas posteriores al ejercicio en sujetos no entrenados. Este aumento se debe a la liberación de proteínas a causa del daño que se produce en la fibras del músculo ya que se encuentran dentro de ellas y al ser dañadas son liberadas (42). Por último los factores de crecimiento también aumentan su actividad ya que juegan un rol importante en la reparación del tejido muscular, el cual fue dañado al realizar el ejercicio excéntrico (43).

Características del efecto de dosis repetidas de ejercicio excéntrico

El término de efecto de las dosis repetidas corresponde a la disminución de síntomas inducidos por el ejercicio excéntrico luego de realizar una segunda sesión similar. Aún no se conoce exactamente cómo se produce esta adaptación, pero las teorías que se manejan involucran adaptaciones neurales, mecánicas y celulares específicas en respuesta al ejercicio excéntrico (16). Este efecto protector se ha visto presente hasta seis meses posteriores a la primera sesión de ejercicio excéntrico (44). En el estudio realizado por Chen y cols (12) midieron marcadores indirectos de daño muscular en 4 sesiones de entrenamiento excéntrico para flexores de codo, las cuales consistieron en 4 series de 30

repeticiones de contracciones excéntricas isocinéticas maximales, las cuales fueron realizadas cada 4 semanas. Después de la primera sesión hubo cambios significativos en los marcadores indirectos de daño muscular (peak de torque, fuerza isométrica, ROM, dolor muscular), no así entre la 2-4 sesión donde no hubo cambios significativos y la recuperación fue mucho más rápida en comparación a la primera sesión. El efecto de series repetidas también tiene un efecto en el grupo muscular contralateral, es decir, que se puede generar un efecto protector al ejercicio excéntrico trabajando solo una extremidad, que al repetirlo con la contralateral el daño muscular inducido por ejercicio, será menor para esta última también (15). Es importante entender este efecto generado por la repetición del ejercicio excéntrico en el tiempo, ya que distintos autores hablan de que el daño muscular generado por el ejercicio excéntrico podría aumentar el riesgo de lesión, ya que la pérdida de fuerza e inhibición muscular provocada por el daño muscular podría sobrecargar la articulación por una mala distribución de cargas (45). Sin embargo, teniendo en cuenta el efecto en dosis repetida, con una buena programación y progresión del ejercicio excéntrico, los efectos negativos podrían atenuarse desde la segunda sesión de entrenamiento y de ahí en adelante conseguir los beneficios que esta modalidad de entrenamiento genera.

Modalidades del ejercicio excéntrico

Como cualquier otro tipo de entrenamiento, hay varias modalidades para favorecer la realización del ejercicio excéntrico. Dentro de estas se incluyen ejercicios con pesos libres y con el propio peso del cuerpo, como por ejemplo la fase de descenso de una sentadilla o estocada (5). Recientemente se ha demostrado que para la musculatura isquiotibial hay ejercicios excéntricos dirigidos hacia esta musculatura los que son conocidos como ejercicios nórdicos (7). Otra modalidad de ejercicio excéntrico es el trote o caminata en descenso, en donde el cuádriceps debe generar una fuerza de frenado para mantener o disminuir el ritmo de trabajo (6). En dos estudios realizado por Peñailillo y cols (3, 46), donde se usó la misma metodología, sujetos sanos fueron sometidos a 3

sesiones de entrenamiento, en una primera instancia a un cicloergómetro concéntrico y en la segunda y tercera a un cicloergómetro excéntrico. Los resultados arrojaron que el consumo de oxígeno para la sesión de trabajo excéntrico fue de un 40-50% menor respecto al consumo requerido en el ejercicio concéntrico a la misma intensidad por 30 minutos. La FC fue un 19% menor, el lactato un 65% menor y el RPE un 22% menor en el ejercicio excéntrico comparándolo con el concéntrico (3). El RPE o escala de Borg es el esfuerzo que el participante percibe al realizar el ejercicio y consta de distintos valores, la cual tiene un valor mínimo de 6 (reposo) y un máximo de 20. También se observó el comportamiento de los sustratos energéticos utilizados durante el ejercicio, donde se observó que la utilización de grasas fue mayor para las sesiones de cicloergómetro excéntrico en relación a la concéntrica (46).

Cicloergómetro excéntrico

El cicloergómetro excéntrico es una modalidad de entrenamiento excéntrico que tiene sus inicios en el año 1952, cuando Abbott y cols (1) utilizaron dos cicloergómetros conectados entre sí a través de las 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, en donde se evidencio que el consumo de oxígeno fue 41%, 49% y 66% menor para el trabajo excéntrico a 25, 35 y 52 rpm, respectivamente. Hoy en día el cicloergómetro excéntrico es una maquina moderna, que a través de un motor incorporado en el cicloergómetro, genera el movimientos de los pedales de manera isocinética a una cadencia o velocidad determinada (Figura 1). Estos avances han logrado abrir las puertas para los estudios con el cicloergómetro excéntrico, los que han aumentado en los últimos años. Esta modalidad de entrenamiento permite realizar un ejercicio repetitivo, de alta potencia, de bajo costo metabólico y multi-articular de forma segura y sin requerimiento de

supervisión especializada o técnica específica. 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 (3, 9, 10, 25, 46). Leong y cols (47) realizaron un estudio en el cual 8 sujetos (4 hombres y 4 mujeres) fueron sometidos a un programa de entrenamiento en cicloergómetro excéntrico a 60 rpm. Este programa consistió en 2 sesiones por semana durante 8 semanas consecutivas. La intensidad fue inicialmente de un 20% de su $PO_{máx}$ por 5 minutos aumentando progresivamente a un 55% de su $PO_{máx}$ durante 10,5 minutos. Terminado el programa de entrenamiento se evidenció un aumento del tamaño muscular del RF en un 24% y VL de un 13% en relación a los valores iniciales. También se encontró un aumento en el $PO_{máx}$ concéntrico de un 5% una semana posterior a la finalización del programa de entrenamiento y de un 9% a las 8 semanas posterior a finalizado el entrenamiento. Los autores concluyeron que el ejercicio en cicloergómetro excéntrico mejora la estructura muscular, reflejado en el aumento del $PO_{máx}$. También sugieren que un tiempo de descanso es importante para detectar ganancias funcionales después de un entrenamiento en cicloergómetro excéntrico.

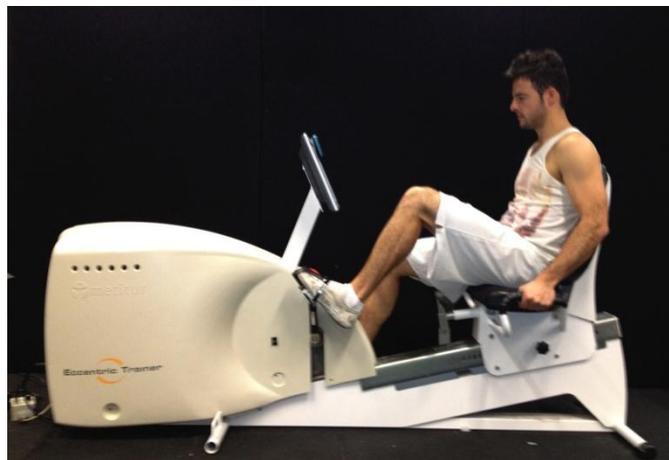


Figura 1: Cicloergómetro excéntrico

Es importante destacar que en todos los estudios mencionados previamente en donde usaron el cicloergómetro excéntrico, este siempre fue usado para ejercitar el grupo muscular extensor de rodilla principalmente, es decir, con un giro de los pedales en sentido posterior. Sin embargo, de los estudios realizados no se puede inferir que estos beneficios tengan el mismo efecto trabajando distintos grupos musculares. Ningún estudio ha investigado cómo se comportan los músculos isquiotibiales al ser sometidos a una sesión de cicloergómetro excéntrico modificada para este grupo muscular. Por lo tanto, parece interesante saber cómo afecta este ejercicio al grupo flexor de rodilla en cuanto al daño muscular y estrés metabólico que se podría inducir en este grupo muscular. Esto aumentaría nuestro conocimiento sobre los posibles beneficios que podría tener el entrenamiento en cicloergómetro excéntrico de esta musculatura tomando en cuenta que es un grupo muscular con alta incidencia de lesiones musculares.

Musculatura Isquiotibial

La musculatura isquiotibial es un grupo muscular biarticular que cumple dos funciones específicas, la flexión de rodilla y extensión de cadera, actuando estos dos movimientos de manera conjunta (48). Las lesiones en este grupo muscular es una de las más comunes en el deporte y presenta una alta tasa de reincidencia que varía entre un 22-34%, siendo estas últimas la de peor pronóstico y que generan un mayor tiempo de ausencia de los deportistas (18). Dentro de los factores de riesgo de las lesiones musculares se encuentra el déficit de fuerza, especialmente cuando el músculo se encuentra cercano a su longitud máxima (fase excéntrica), siendo influenciado por la posición de la cadera ya que al ser un músculo biarticular, la flexión de cadera aumenta su longitud (49), calentamiento deficiente (17) y uno de suma importancia como lo es haber presentado una lesión de isquiotibiales previa (20, 50). Un estudio realizado por Mjolsnes y cols (17) en futbolistas profesionales y semi-profesionales, comparó un entrenamiento de fuerza concéntrica versus uno de fuerza excéntrica, obteniendo como resultados

que el entrenamiento de fuerza excéntrica tiene mayor ganancia de fuerza excéntrica y similares ganancias en cuanto a la fuerza concéntrica de cuádriceps en relación al entrenamiento concéntrico, lo que mejoro la relación cuádriceps/isquiotibial. Estos beneficios del entrenamiento excéntrico también se pueden obtener en una población sedentaria, como se demostró en el estudio de Kaminski y cols (51), donde se comparó un entrenamiento excéntrico versus uno concéntrico, dos veces por semana durante seis semanas medido a través de fuerza isocinética. Se encontró un aumento significativo en la fuerza concéntrica de un 17% ($60^{\circ}\cdot s^{-1}$) y 25% ($180^{\circ}\cdot s^{-1}$) en el grupo excéntrico y un aumento no significativo de un 13% ($60^{\circ}\cdot s^{-1}$) y 2% ($180^{\circ}\cdot s^{-1}$) en el grupo concéntrico.

El aumento en la fuerza excéntrica es sumamente importante pensando en los mecanismos de lesión más comunes que se presenta en este grupo muscular, de los cuales se mencionan el estiramiento del músculo en posiciones articulares extremas (20). Es en esta fase donde el entrenamiento excéntrico genera un efecto beneficioso produciendo un desplazamiento del ángulo óptimo, el cual es el punto de mayor torque producido por el músculo. Este desplazamiento del ángulo óptimo generado por el entrenamiento excéntrico ocurre hacia largas longitudes musculares, es decir, el músculo tendrá una mayor resistencia a la tensión generada en posiciones de gran elongación (52). Otro mecanismo de lesión es durante una carrera o en un sprint, ya que en estas, las lesiones se producen mayormente en la fase de oscilación terminal donde la musculatura isquiotibial absorbe gran energía cinética para desacelerar el movimiento producido por la extremidad inferior, por lo que hay mayor riesgo de lesión (20, 48). Por lo tanto, si analizamos los mecanismos mencionados, los isquiotibiales se ven más dañados durante la fase excéntrica, por lo que podría ser sumamente beneficioso el realizar un entrenamiento excéntrico enfocado a esta fase en esta musculatura.

En los últimos años se han utilizado programas de entrenamiento excéntrico dirigidos a la prevención y rehabilitación de lesiones en los isquiotibiales (19). Hay evidencia de que los programas de entrenamiento excéntrico han contribuido en la reducción de lesiones nuevas y recurrentes en los isquiotibiales (19, 53). Así, el

cicloergómetro excéntrico enfocado para la musculatura isquiotibiales en estos casos podría ser una buena herramienta a utilizar ya que el paciente resiste el movimiento de los pedales según sus capacidades y el ejercicio en cicloergómetro no es de compleja ejecución y es reproducible por la gran mayoría de la población.

Por lo tanto, la presente tesis de pre-grado tiene como objetivo ser el primer estudio en evaluar los efectos del cicloergómetro excéntrico utilizado para ejercitar el grupo muscular flexor de rodilla, donde en este caso se cambiara el giro de los pedales hacia anterior para lograr el ejercicio excéntrico de este grupo muscular a medida que se resiste el pedaleo. Es de nuestro interés evaluar la respuesta, tanto del estrés metabólico, a través de VO_2 , FC y RPE, como el daño muscular inducido a través de potencia de salto vertical, flexibilidad, EVA y PPT, y realizar una comparación con la respuesta obtenida por la ejecución de ejercicio excéntrico enfocado a los extensores de rodilla en el cicloergómetro excéntrico. Con esto buscamos determinar si el ejercicio en cicloergómetro excéntrico para isquiotibiales podría ser utilizado en acondicionamiento deportivo, rehabilitación y/o prevención.

i.- Pregunta de investigación

¿Cuál es la magnitud del daño muscular y el estrés metabólico de ejercicio en cicloergómetro excéntrico enfocado a los músculos flexores de rodilla en comparación a los extensores de rodilla?

ii.- Hipótesis

- H0: La magnitud del daño muscular y el estrés metabólico no es mayor en los flexores de rodilla en comparación a los extensores de rodilla durante un ejercicio de cicloergómetro excéntrico a la misma intensidad

- H1: La magnitud del daño muscular y el estrés metabólico es mayor en los flexores de rodilla en comparación a los extensores de rodilla durante un ejercicio de cicloergómetro excéntrico a la misma intensidad

iii.- Objetivo general

- Comparar la magnitud del daño muscular y el estrés metabólico entre el grupo muscular extensor de rodilla y flexor de rodilla durante una sesión de ejercicio en el cicloergómetro excéntrico para cada grupo muscular.

iv.- Objetivos específicos

- Comparar el consumo de oxígeno, frecuencia cardiaca, RPE durante las sesiones de ejercicio en el cicloergómetro excéntrico para EXT y FLEX.
- Comparar las pérdidas de la función muscular antes, inmediatamente después y 1° al 4° día posterior a la sesión de cicloergómetro excéntrico entre los EXT y FLEX.
- Comparar los cambios en el ROM antes, inmediatamente después y 1° al 4° día posterior a la sesión de cicloergómetro excéntrico entre EXT y FLEX.
- Comparar la percepción de dolor antes, inmediatamente después y 1° al 4° día posterior a la sesión de cicloergómetro excéntrico entre los EXT y FLEX.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

a.- Diseño de investigación

La presente investigación tiene un diseño de estudio con enfoque cuantitativo, alcance exploratorio y finalidad experimental, un tiempo longitudinal y prospectivo.

b.- Universo, población y muestra

Universo: Estudiantes de la Universidad Finis Terrae

Población: Estudiantes varones, sanos y sedentarios de la Universidad Finis Terrae

Muestra: 10 estudiantes varones definidos según los criterios de inclusión y exclusión, que tengan la disposición para colaborar con la investigación dentro del mes de marzo y abril.

Seleccionamos la muestra por motivos de conveniencia geográfica

c.- Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de Inclusión

- Varones entre los 18 y 32 años de edad, estudiantes de la Universidad Finis Terrae
- Sujetos sanos y sedentarios sin haber realizado ningún tipo de ejercicio de resistencia muscular o similar a estos en extremidad inferior durante los últimos 6 meses de manera regular
- Sujetos con disponibilidad de tiempo para realizar las evaluaciones en los tiempos requeridos
- Participantes con consentimiento informado firmado

Criterios de exclusión

- Sujeto que sea usuario de algún tipo de suplemento alimenticio en los últimos 6 meses
- Varones que presenten algún tipo de alteración neurológica
- Varones que presenten algún tipo de lesión musculoesquelética en extremidad inferior
- Varones que presenten alguna alteración cardiovascular
- Participante incapaz de realizar la prueba según los criterios estandarizados
- Sujeto incapaz de completar la sesión de 30 minutos

d.- Metodología

Participantes

10 hombres sanos sedentarios, que no hayan realizado ningún tipo de entrenamiento de resistencia muscular de extremidad inferior dentro de los 6 meses previos a la evaluación inicial, sin patologías musculoesqueléticas o neuromusculares, fueron reclutados para el estudio. Previo a someter a los sujetos a las evaluaciones de nuestro proyecto, todos los participantes firmaron un consentimiento informado (Anexo N°1) y respondieron un breve cuestionario médico (Anexo N°2) para descartar cualquier tipo de patología que no le permitiera realizar la prueba de esfuerzo máximo o que no le permitiera realizar ejercicio físico a una alta intensidad. El tamaño de la muestra fue estimado usando datos de un estudio previo (3) en donde la disminución de la altura durante un CMJ fue comparada entre la primera y segunda sesión de 30 minutos del cicloergómetro excéntrico (ECC1 y ECC2). Con $\alpha = 0.05$ y una potencia estadística ($1 - \beta$) de 0.8, y una potencial diferencia de 10% en la altura del CMJ entre las sesiones al primer día después del ejercicio excéntrico, se encontró que 8 sujetos serían suficientes. Sin embargo, 10 sujetos fueron reclutados tomando una posible atrición del 20%.

Diseño del estudio

Los participantes se presentaron en el Laboratorio de Ciencias del Ejercicio de la Universidad Finis Terrae. En primera instancia, previo a la intervención, los participantes se presentaron como mínimo 2 días previos a la primera sesión en el cicloergómetro excéntrico para una evaluación de consumo máximo de oxígeno ($VO_{2m\acute{a}x}$) y potencia máxima concéntrica ($PO_{m\acute{a}x}$). A continuación se comenzó el periodo de intervención en dos bloques de cinco días con dos semanas de separación entre las sesiones de ejercicio. El primer día de cada bloque, los sujetos realizaron 30 minutos en el cicloergómetro excéntrico enfocada para los músculos extensores de rodilla (EXT) y músculos flexores de rodilla (FLEX), respectivamente. Durante cada sesión de cicloergómetro excéntrico se controlaron

las variables metabólicas de FC, consumo de oxígeno (VO_2) y el índice de esfuerzo percibido (Escala de Borg: 6-20). En adición, se realizarán evaluaciones de potencia del peak concéntrico y tiempo de vuelo durante SJ y CMJ, flexibilidad muscular y dolor muscular, todas estas pruebas se midieron antes, inmediatamente después y a los 1-4 días posteriores a ambas sesiones de cicloergómetro excéntrico (EXT y FLEX).

Ejercicio en cicloergómetro excéntrico

Ambas sesiones de cicloergómetro excéntrico se realizaron a 60 revoluciones por minuto (rpm) por 30 minutos al 60% de la potencia máxima concéntrica ($PO_{m\acute{a}x}$) basados en la prueba incremental de consumo peak de oxígeno (VO_{2peak}). La elección del 60% del $PO_{m\acute{a}x}$ fue en base a los estudios previos realizados por Peñailillo et al. (3). La prueba de $VO_{2m\acute{a}x}$ se realizó a través de un test incremental usando un cicloergómetro reclinado (LifeFitness, Lifecycle 9500HR Dovetail Recumbent Bike). 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 (Anexo N°5). La cadencia fue mantenida a 60 rpm y 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 VO_{2peak} se les familiarizó con las pruebas y mediciones a realizar. El pedaleo excéntrico se realizó en una bicicleta estática reclinada que contiene un motor el cual mueve los pedales a una cadencia determinada (Eccentric Trainer, Metitur, Finlandia)(Figura 2). 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, requiere contracciones excéntricas principalmente los músculos extensores de la rodilla. Este es el primer estudio en donde se utilizará el cicloergómetro excéntrico programada para realizar el movimiento de los pedales en sentido anterior, en donde nosotros los principales músculos solicitados fueron los flexores de rodilla y cadera. Para familiarizarse con el pedaleo, inmediatamente antes de cada pedaleo excéntrico,

el participante realizó 5 minutos de pedaleo partiendo en 30 rpm hasta llegar a las 60 rpm intentando acercarse a su carga a realizar pero enfocándose más en ejercer la resistencia de forma correcta más que en lograr la intensidad.

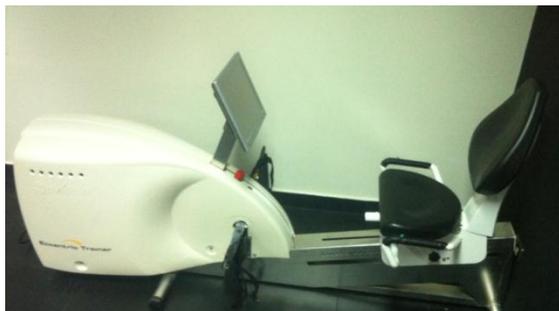


Figura 2. Eccentric Trainer, Metitur.

Parámetros metabólicos

Dentro de estas se incluyó el peak de consumo de oxígeno (VO_{2peak}), el cual se midió a través de un analizador de gases espirados de circuito abierto (Medisoft, Bélgica)(Figura 2A), la FC se controló a través de un monitor cardiaco Zephyr (HxM, USA)(Figura 2B) y el índice de esfuerzo percibido (RPE) utilizando una escala de Borg 6-20. El VO_{2max} y la FC fueron controlados durante los 30 minutos de ejercicio de cada sesión. El RPE fue controlado al minuto 10, 20 y 29 del ejercicio.



Figura 2. Medición de parámetros metabólicos

A. Carro metabólico Medisoft

B. Monitor de FC Zephyr HxM Smart,

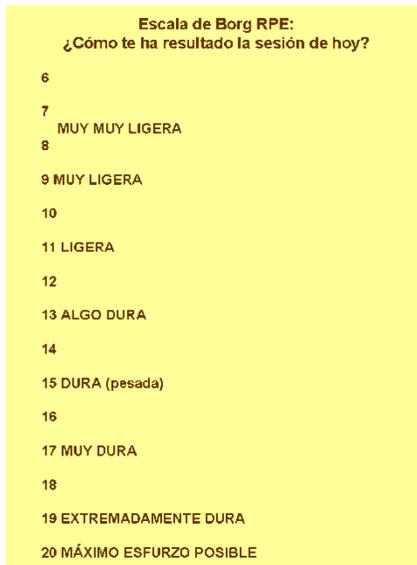


Figura 3. Escala de Borg 6-20.

Salto vertical

Las primeras evaluaciones que se realizaron fueron las pruebas de salto (Figura 4), primero la tipo squat (SJ) e inmediatamente posterior a este el salto contramovimiento (CMJ). Para el CMJ se les solicitó a los participantes iniciar en la posición bípeda con las manos en la cadera, para luego realizar un contramovimiento antes de la fase de ascenso (concéntrica) saltando lo más alto posible que puedan. Para el salto tipo squat las indicaciones fueron las mismas, pero la posición de inicio fue desde los 90° de flexión de rodilla, es decir se anulara la fase de descenso (excéntrica) que tiene el CMJ. Se midió el peak de potencia concéntrica y tiempo de vuelo, utilizando una plataforma de fuerza (Globus, Italia) y los datos fueron analizados usando el software del fabricante TESys 1000 (Globus System). El mejor salto de 3 intentos fue el utilizado para analizar los datos entregados.



Figura 4. Salto vertical en plataforma TESys 1000, Globus.

Rigidez muscular

Posterior a las pruebas de salto se medirá la rigidez de los distintos grupos musculares, donde se cuantificará el rango de movimiento articular (ROM) y el dolor (EVA, explicada en el Dolor muscular) en la extremidad dominante.

Para evaluar la rigidez muscular de los músculos utilizaremos diferentes pruebas:

Active Knee Extension (AKE): (Figura 5) donde el participante se encuentra en posición supina, la cadera debe quedar estabilizada en 90° de flexión la que puede ser sostenida con sus propias manos sujeta el muslo en esta posición fija, con la rodilla relajada, luego se le solicita llevar la rodilla a extensión de manera activa en donde se cuantificó el ROM faltante para la extensión de rodilla completa (180°), si es que lo hay (68).



Figura 5. Pruebas de flexibilidad: AKE

Straight Leg Raise (SLR): (Figura 6) donde se ubica al participante en la posición supina y con la pierna en completa extensión, el evaluador pasivamente lleva a flexión de cadera y cuantifica el ROM alcanzado.



Figura 6. Pruebas de flexibilidad: SLR

Thomas: donde se ubica al participante al borde de una camilla con las extremidades inferiores colgando, la pierna a evaluar se deja colgando en la camilla y la otra el mismo evaluador ubica la planta del pie del evaluado en su pecho con flexión de rodilla y la carga hacia la flexión de cadera que más pueda, posterior a esto el evaluador ubica su mano en el muslo de la pierna que está colgando y lo lleva hacia la extensión de cadera y se cuantifica el ROM de extensión de cadera (Psoas). Luego de esta medición, con la cadera neutra (0°), el evaluador lleva la misma pierna hacia la flexión de rodilla (Cuádriceps) en donde también se cuantifica el ROM alcanzado.



Figura 7. Pruebas de flexibilidad: Thomas

Sit-and-Reach (SR): (Figura 7) donde el participante se ubica sentado en el suelo con las rodillas extendidas y con la planta de los pies descalzos contra un cajón el cual tiene sobre su cara superior una regla que mide los centímetros que el sujeto alcance con sus manos al inclinarse contra el cajón. Esta última prueba buscó medir más que nada de manera global la flexibilidad del sujeto y no un grupo muscular en particular, ver si se afectó o no con los ejercicios y cuanto fue el dolor que manifestaron si es que estuvo presente.



Figura 8. Pruebas de flexibilidad: Sit and Reach

Dolor muscular

Para cuantificar el dolor muscular se utilizó una escala visual análoga (EVA) de 100 mm (Anexo N°4), en donde 0 indica que no existe nada de dolor y 100 indica el peor dolor experimentado en sus vidas. A los participantes se les solicitó marcar el nivel de dolor percibido en la escala EVA tanto para los extensores como los flexores de rodilla en las evaluaciones previo al ejercicio y en los días posteriores al ejercicio excéntrico realizado por cada grupo muscular según el protocolo. Primero se utilizó la EVA en las pruebas de flexibilidad explicadas anteriormente. También se consultó el dolor al caminar, bajar y subir escaleras. Otra prueba para cuantificar el dolor fue la de umbral de dolor a la presión (PPT) con un algómetro digital (Force One FDIX, Wagner, USA)(Figura 8) 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 (69). 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 50% de distancia entre la EIAS y borde lateral de la patela y recto femoral (RF) a 50% de distancia de la EIAS y la patela. Para los flexores de rodilla se midió el bíceps femoral (BF) al 50% de distancia entre el isquion y el cóndilo lateral del fémur, el

semitendinoso (SM) al 50% de distancia entre el isquion y el cóndilo medial del fémur y el glúteo mayor (GM) al 50% de distancia del trocánter mayor y las vértebras sacras. El algómetro se ubicó perpendicular al punto (1 cm² de área de estimulación) donde el investigador aplicó gradualmente una presión de 50 kPa-s hasta que el participante manifestó la primera sensación de dolor en cada musculo de la extremidad dominante. El promedio de 3 medidas fue el dato a analizar.



Figura 9. Algómetro Force One FDIX, Wagner, USA

e.- Variables del estudio

Variable independiente

Ejercicio excéntrico

Este se define como el ejercicio en cicloergómetro excéntrico a una intensidad del 60% del $PO_{máx}$ de cada individuo, con una duración de 30 minutos por cada sesión. Este fue realizado por los sujetos en una sesión para el grupo muscular extensor de rodilla y en otra sesión para el grupo muscular flexor de rodilla.

Variables dependientes

| Variable dependiente | | Definición conceptual | Dimensiones | Indicadores | Instrumento |
|----------------------|----------------|--|--|---------------------------|---|
| Función Muscular | Salto Vertical | Salto contra-movimiento (CMJ) | Peak de potencia máxima concéntrica alcanzada en el salto | Newton (N) | Plataforma de salto |
| | | Salto tipo Squat (SJ) | Tiempo de suspensión en el aire desde la fase de despegue hasta el posterior contacto. | Segundos | |
| | ROM | Capacidad del musculo de estirarse sin generar daño en su estructura | AKE 0°- -55° SLR 60°-90° ThoQ 55°-90° ThoPS -20°-20° SR -15 – 15 cms | ROM° | Goniómetro |
| | | | | Centímetros (cms) | Cajón 35x45x32 cm y huincha sobre este |
| Dolor muscular | | Manifestación sensorial y emocional en respuesta a un daño muscular | Dolor percibido | Newton (N) 0-100mm | PPT (Algómetro) EVA (Bajar escalas, salto, flexibilidad) |

Variables desconcertantes

- Que el sujeto no logre una adecuada coordinación al realizar la prueba
- Que el sujeto no realice su máximo esfuerzo en la medición de $PO_{m\acute{a}x}$
- Condiciones físicas y anímicas del sujeto al momento de la medición
- Que la edad del sujeto tenga algún efecto en la extensión del daño muscular inducido por el ejercicio.
- Calibración inadecuada del aparato
- Que las instrucciones dadas por el evaluador sean mal comprendidas o explicadas

f.- Análisis estadístico

Se realizó estadística descriptiva con cálculos de media (\bar{X}) y desviación estándar (SD) para todas las variables dependientes.

Se utilizó un ANOVA de dos vías con medidas repetidas para la comparación de las variables del daño y función muscular en el tiempo entre ambos grupos FLEX y EXT. Si un efecto principal significativo era encontrado, se realizó un post-hoc utilizando el test de Fisher LSD. Para las variables de gasto metabólico se utilizó un t-test pareado o dependiente.

También se utilizó un ANOVA de una vía para comparar los cambios producidos dentro de una misma variable a lo largo del tiempo.

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 $P < 0.05$. Los datos son presentados en el texto como promedio \pm desviación estándar.

Capítulo 3: Resultados

De los 10 sujetos, dos no fueron capaces de completar el estudio por lo que la estadística se realizó con solo 8 sujetos. La edad promedio de estos 8 participantes es de 23.3 ± 0.7 años, los cuales promediaban un peso de 75.7 ± 9.3 Kg en el periodo de evaluación. La talla promediada es de 176.1 ± 3.6 cms lo que arroja un IMC promedio de 24.5 ± 3.6 .

Parámetros metabólicos

La potencia promedio durante el pedaleo fue similar ($P = 0.09$) durante el ejercicio de cicloergómetro excéntrico enfocado a los músculos extensores (EXT) y flexores (FLEX) de rodilla mostrando una potencia media de 168.2 ± 25.8 y 150.6 ± 32.2 W, respectivamente. El VO_2 promedio fue un 23.1% menor durante el ejercicio excéntrico enfocado a los EXT comparando con los FLEX (0.93 ± 0.24 vs 1.21 ± 0.24 L/min⁻¹, $P = 0.018$) como muestra la Figura 10A. Además, la Figura 10B muestra que la FC fue de un 13.7% menor (130.2 ± 11.2 vs 150.8 ± 12.9 latidos/min⁻¹, $P = 0.007$) y la RPE (Figura 10C) fue un 17.9 % menor (11.5 ± 2.3 vs 14 ± 1.6 , $P = 0.015$) en EXT comparando con FLEX.

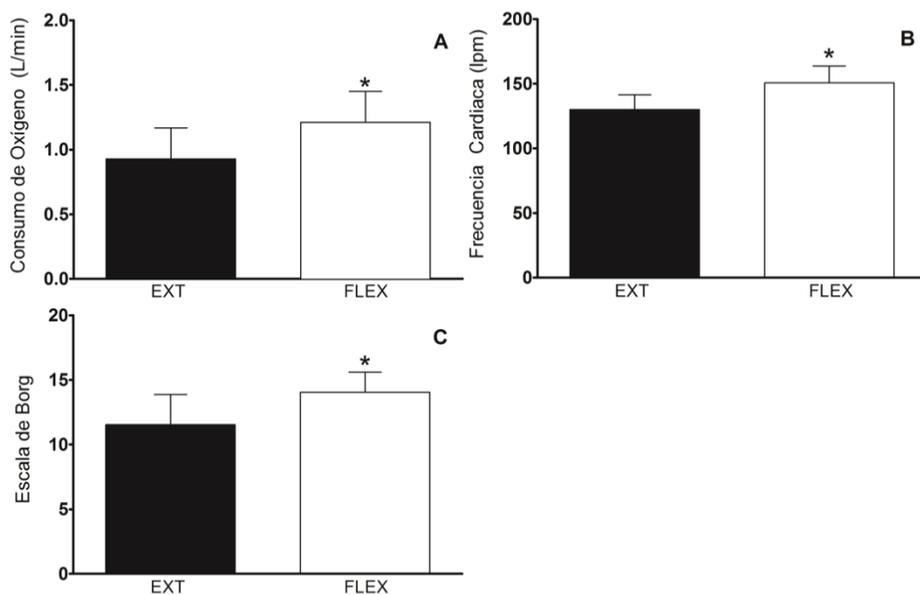


FIGURA 10. Comparación del promedio del consumo de oxígeno (A), frecuencia cardíaca (B) y percepción del esfuerzo (Escala de Borg 0-20) (C) durante los 30 minutos de la sesión de cicloergómetro excéntrico enfocado para extensores (EXT) y flexores (FLEX). *Significativamente ($P < 0.05$) diferente.

Marcadores indirectos de daño muscular

Función muscular

Salto Vertical

El ANOVA de dos vías con medidas repetidas no encontró un efecto principal de interacción para el peak de potencia máxima concéntrica ($P_{\text{máx}_{\text{con}}}$) en el CMJ y SJ entre EXT y FLEX ($P = 0.878$ y $P = 0.389$, respectivamente). Sin embargo, el CMJ posterior a EXT mostró una disminución significativa (8-9%) en el $P_{\text{máx}_{\text{con}}}$ inmediatamente post-ejercicio y 1 y 2 días después de EXT en relación al Pre ($P = 0.002$, $P = 0.018$ y $P = 0.011$, respectivamente). En FLEX se observó una tendencia similar con una disminución significativa (7-8%) de la $P_{\text{máx}_{\text{con}}}$ en el CMJ inmediatamente post-ejercicio y día 2 ($P = 0.03$, $P = 0.021$ respectivamente) como lo muestra la Figura 11A. En SJ, solo se observó un descenso significativo (5-6%) en los FLEX 1 y 2 días post ejercicio ($P = 0.04$ y 0.03 , respectivamente) comparado a los valores pre ejercicio (Figura 11B).

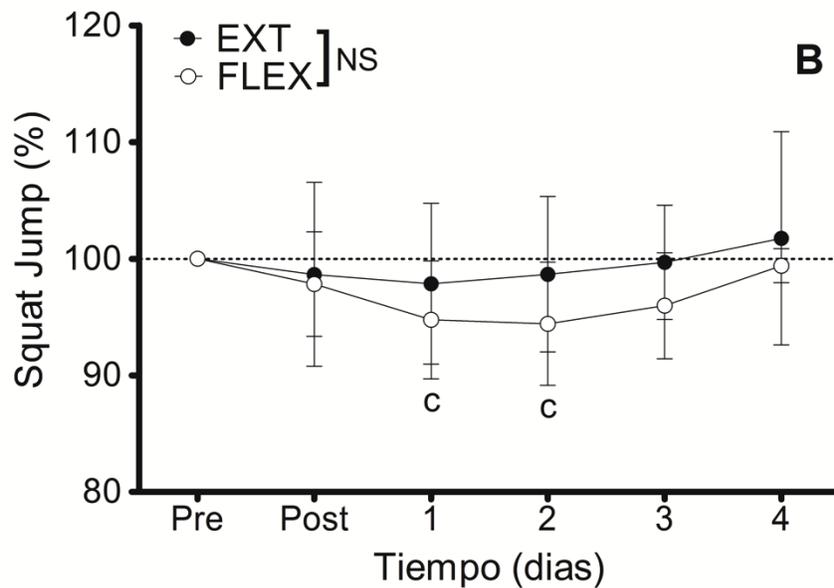
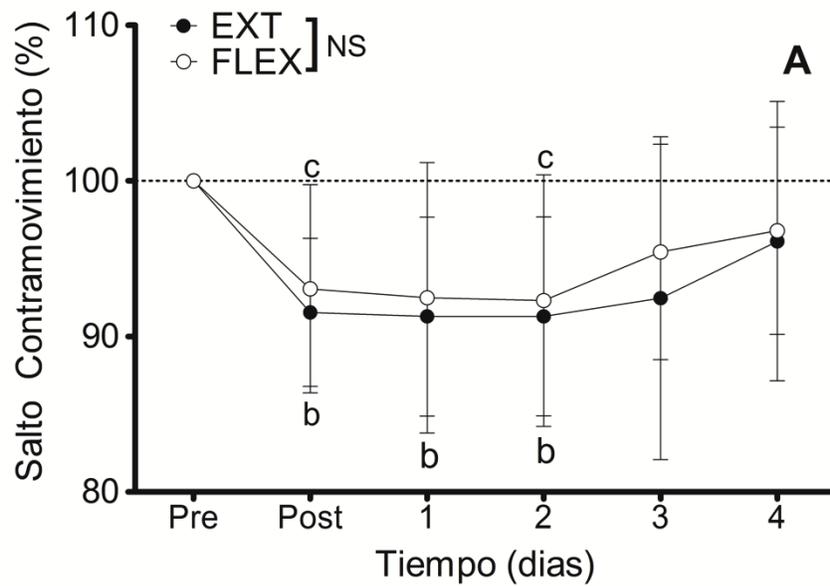


FIGURA 11. Cambios en el peak concéntrico de potencia del salto contramovimiento (A) y el squat jump (B) en relación al Pre- (100%) inmediatamente el Post-ejercicio (Post) y los 1-4 días después de las sesiones de ejercicio excéntrico enfocado para EXT y FLEX. Los valores mostrados representan el promedio \pm desviación estándar. b: Significativamente ($P < 0.05$) diferente del Pre- EXT. c: Significativamente ($P < 0.05$) diferente del Pre- FLEX.

Dolor muscular

EVA

Basado en el efecto de interacción obtenido del ANOVA de dos vías se observa una diferencia significativa en el dolor muscular percibido entre EXT y FLEX durante la realización de un CMJ ($P= 0.011$) y en la actividad de subir y bajar escaleras ($P= 0.038$) como muestra la Figura 12A y 12C. Las diferencias significativas entre EXT y FLEX se evidencian a los 2, 3 y 4 días post-ejercicio ($P= 0.0001$, $P= 0.042$ y $P= 0.015$, respectivamente) para el CMJ y a los 1 y 2 días post-ejercicio ($P= 0.032$, $P= 0.015$, respectivamente) al subir y bajar escaleras. El ANOVA de una vía mostró que el dolor durante el CMJ (Figura 12A) aumentó significativamente en ambos grupos a los 1-4 días post EXT ($P= 0.022$, $P= 0.00$, $P= 0.003$ $P= 0.017$, respectivamente) y a los 1-3 días post- FLEX ($P= 0.013$, $P= 0.015$, $P=0.005$, respectivamente) en relación al pre. En el SJ (Figura 12B) el dolor muscular aumentó significativamente a los 1-4 post- EXT en relación al pre ($P= 0.01$, $P= 0.00$, $P= 0,002$ y $P= 0.018$, respectivamente). Después de FLEX el dolor muscular aumentó durante 1-4 días post- FLEX ($P= 0.003$, $P= 0.006$, $P= 0.005$ y $P= 0.048$, respectivamente) en comparación a los valores pre- ejercicio.

El EVA al subir y bajar escaleras (Figura 12C) aumentó significativamente durante los 4 días post EXT en relación al pre ($P= 0.003$, $P= 0.001$, $P= 0.007$ y $P= 0.028$, respectivamente), similar comportamiento al que se observó después de FLEX ($P= 0.007$, $P= 0.006$, $P= 0.011$ y $P= 0.036$, respectivamente). El EVA al caminar reportado post-EXT aumentó significativamente a los 1-3 días después del ejercicio en relación al pre ($P= 0.019$, $P= 0.002$ y $P= 0.014$, respectivamente), al igual que post-FLEX ($P= 0.031$, $P= 0.007$ y $P= 0.023$).

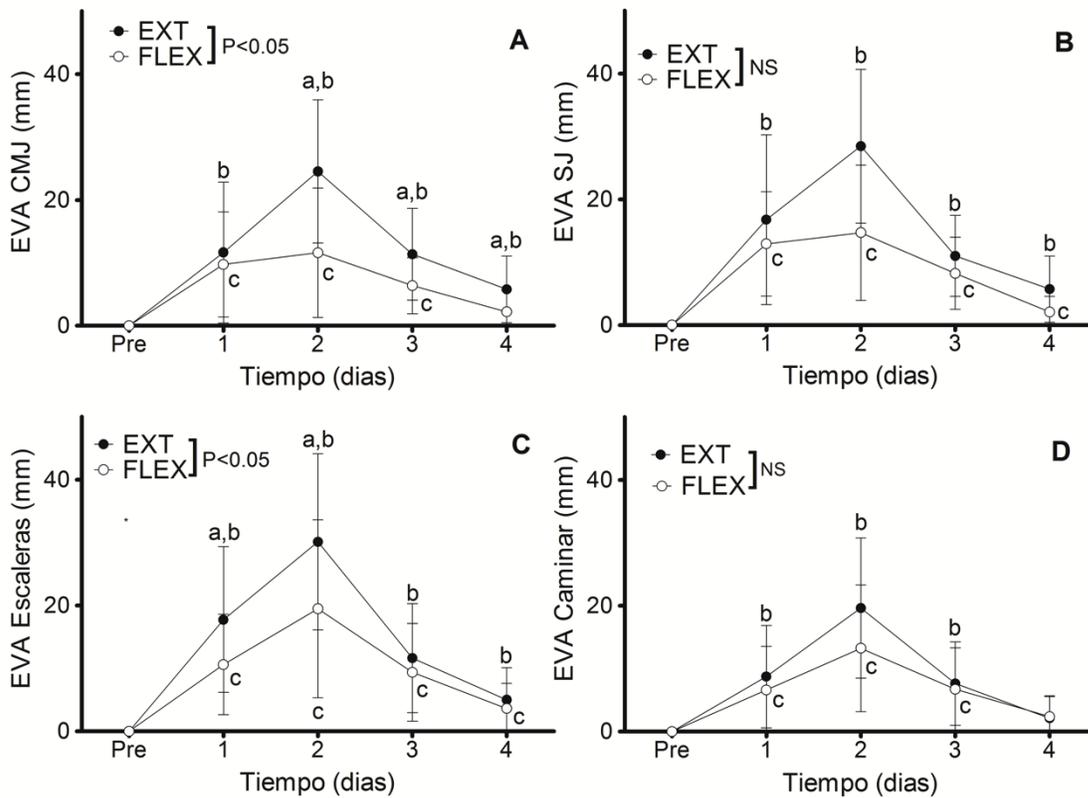


FIGURA 12. Cambios en el dolor muscular medidos a través de EVA (mm) para el salto contramovimiento (A), squat jump (B), subir/bajar escaleras (C) y caminar (D) en relación al Pre- y los días 1-4 posteriores a la sesión de cicloergómetro excéntrico para EXT y FLEX. a: Diferencia significativa ($P<0.05$) entre EXT y FLEX. b: Significativamente ($P<0.05$) diferente del Pre-EXT. c: Significativamente ($P<0.05$) diferente del Pre-FLEX.

PPT

Basado en el ANOVA de dos vías, el PPT mostró un efecto principal de interacción significativo entre EXT y FLEX solo en el músculo GM ($P= 0.004$). Así, esta diferencia fue evidente al día 1 post ejercicio ($P= 0,03$). El PPT-VL (Figura 13A) después de EXT mostró una disminución significativa a los 1-3 días post-EXT en relación al pre (29%; $P= 0.01$, 43%; $P= 0.000$ y 25%; $P= 0.029$, respectivamente). Después de FLEX hubo una disminución significativa del PPT-VL a los 1 y 2 días post ejercicio (15%; $P= 0.048$ y 17%; 0.027, respectivamente). En PPT-VM (Figura 13B) se produjo una disminución significativa en EXT a los 1-3 días post-ejercicio (30%; $P= 0.000$, 34%; $P= 0.000$ y 23%; $P= 0.012$,

respectivamente). Sin embargo, esto no fue observado post-FLEX donde no hubo cambios significativos. En el PPT-RF (Figura 13C) solo se vieron disminuciones significativas a los 1 y 2 días post- EXT comparado al pre- (24%; $P= 0.000$ y 20%; $P= 0.027$, respectivamente). El PPT-GM (Figura 13D) mostró disminuciones significativas a los 1 y 2 días post-EXT en relación al pre- (23%; $P= 0.003$ y 18%; $P= 0.035$, respectivamente) y solo al 1 día post-FLEX comparado con pre- (8%; $P= 0.011$). En el PPT-ST (Figura 13E) solo hubo cambios significativos a los 1-3 días post-FLEX en comparación al pre- (13%; $P= 0.037$, 21%; $P= 0.000$ y 8%; $P= 0.006$, respectivamente). Similar comportamiento fue observado en PPT-BF (Figura 13F) donde al igual que ST hubo cambios significativos solo post-FLEX pero a los 1-4 días (10%; $P= 0.012$, 19%; $P= 0.006$, 12%; $P= 0.002$ y 8%; $P= 0.025$, respectivamente).

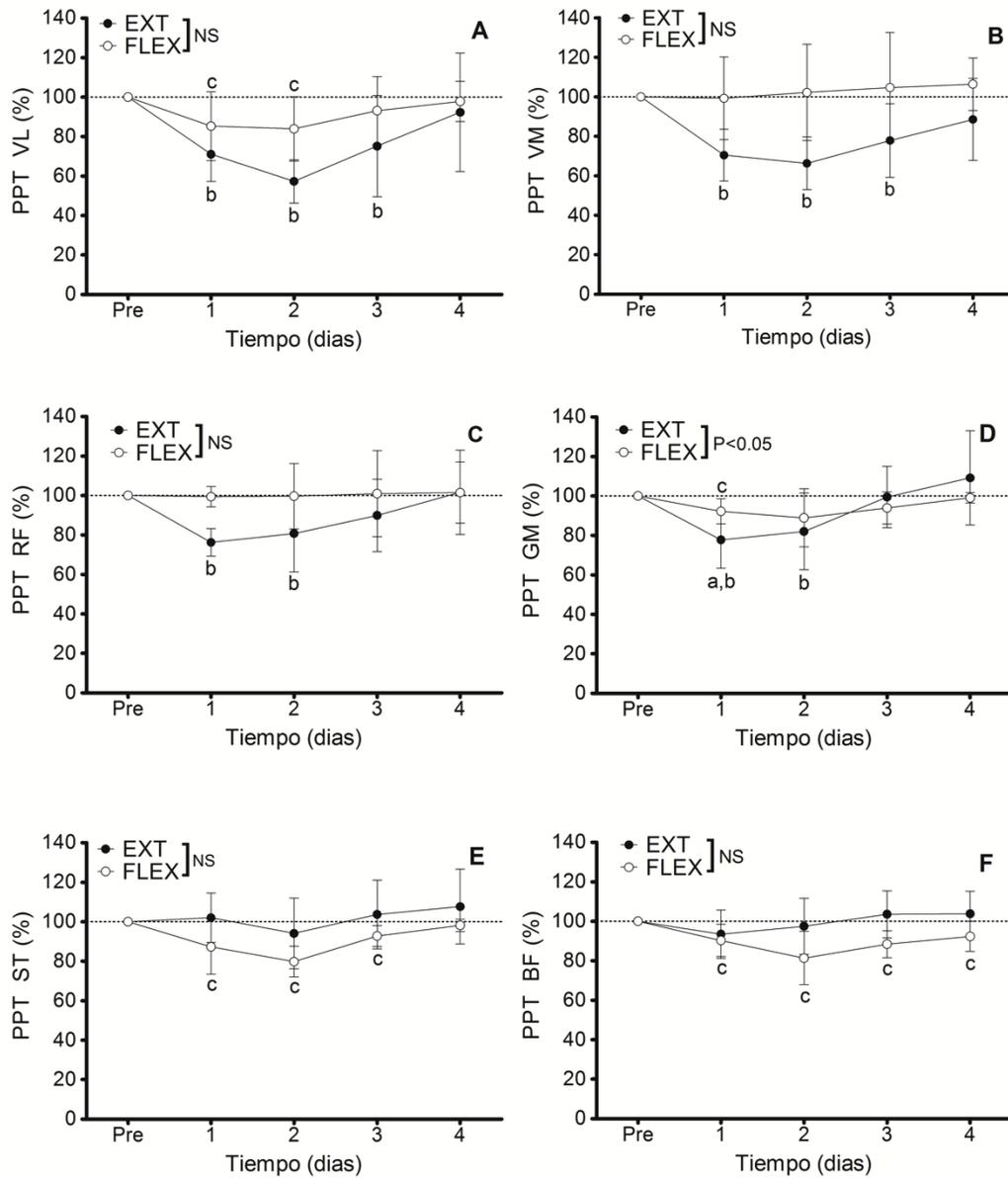


FIGURA 13. Cambios en el umbral del dolor a la presión (ingles: pain pressure threshold: PPT) para los músculos VL (A), VM (B), RF (C), GM (D), ST (E) y BF (F) en relación al Pre- (100%) y a los 1-4 días posterior a la sesión de cicloergómetro excéntrico para EXT y FLEX. a: Diferencia significativa ($P<0.05$) entre EXT y FLEX. b: Significativamente ($P<0.05$) diferente del Pre-EXT. c: Significativamente ($P<0.05$) diferente del Pre-FLEX.

Rigidez muscular

ROM

El ROM (Figura 14) evidencio diferencias significativas entre EXT y FLEX en las pruebas de AKE ($P= 0.007$) y THOPS ($P= 0.026$), estas diferencias se presentaron a los 1 ($P= 0.028$) y 2 ($P= 0.049$) días para la prueba AKE. Basado en el ANOVA de una vía se observó una disminución del ROM en la prueba de AKE inmediatamente post-ejercicio, 1, 2 y 3 días post-FLEX (-8.3° ; $P= 0.001$, -13.13° ; $P= 0.002$, 13.3° ; $P= 0.005$ y 6.1° $P= 0.032$, respectivamente) y sin diferencias significativas post-EXT. En la prueba SLR solo se encontró disminuciones significativas inmediatamente post- FLEX ($P= 0.001$) donde el ROM disminuyo ($6.3^\circ \pm 3.1^\circ$ aprox). El THOPS tuvo una disminución ($-6.5^\circ \pm 7.8^\circ$, $P= 0.049$) al 4 día post-EXT, y solo inmediatamente post-FLEX ($-5.8^\circ \pm 2.5^\circ$, $P < 0.001$). En la prueba THOQ se observó una disminución significativa al día 4 post-EXT (-9.3° ; $P= 0.049$) y hubo una disminución significativa inmediatamente post- para los FLEX ($3.6^\circ \pm 3.4^\circ$, $P= 0.02$). En la prueba de SR se observó un aumento significativo en el día 4 post-EXT ($P= 0.019$) y una disminución significativa los 1 y 2 días post-FLEX ($P= 0.011$ y $P= 0.017$, respectivamente).

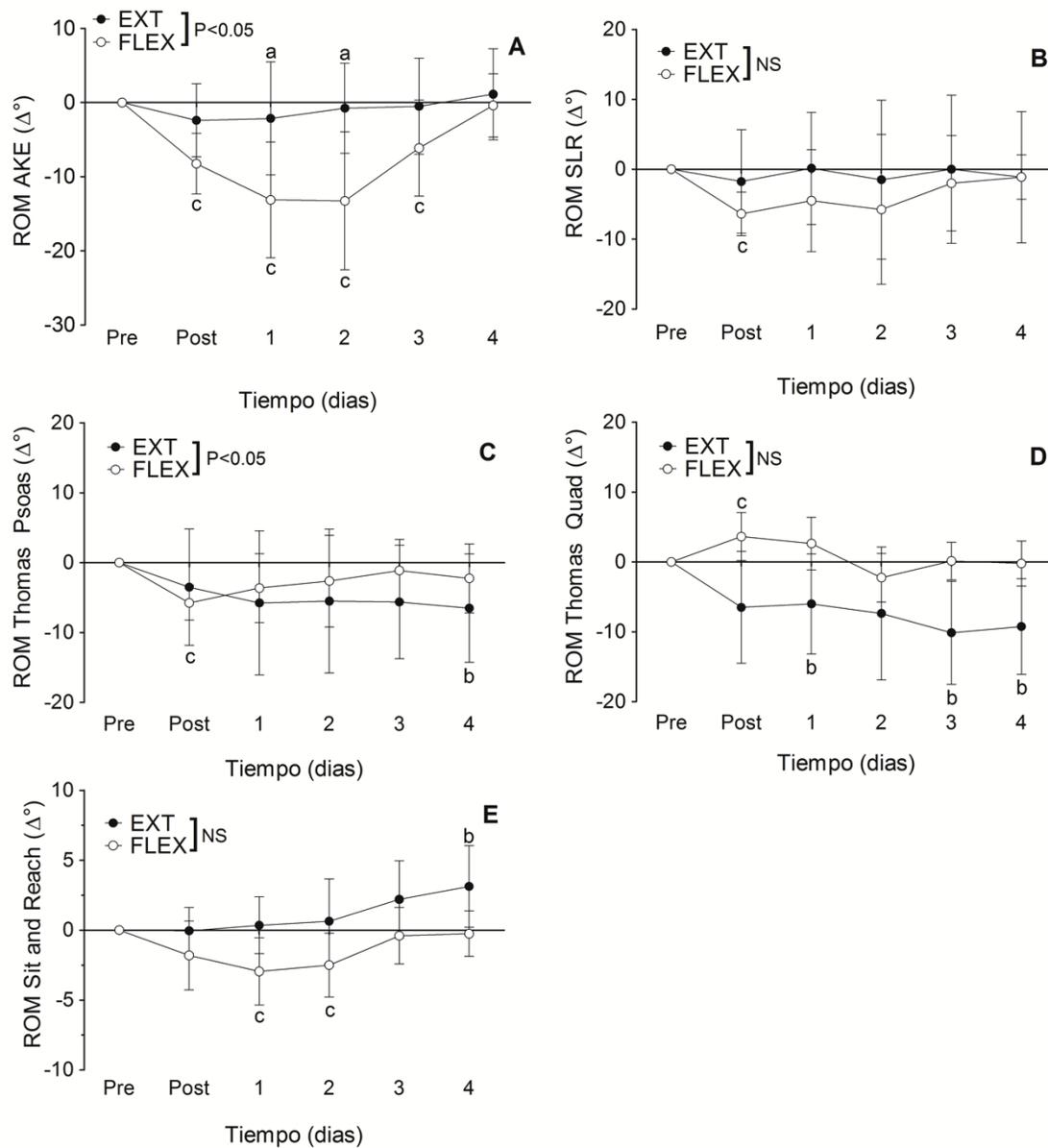


FIGURA 14. Diferencia en grados ($^\circ$) del rango de movimiento en las pruebas de evaluación de flexibilidad AKE (A), SLR (B), Thomas Psoas (C), Thomas Cuádriceps (D) y Sit and Reach (E) en relación al Pre- a inmediatamente Post-ejercicio y los 1-4 días posteriores a las sesiones de cicloergómetro excéntrico para Extensores y Flexores. a: Diferencia significativa ($P<0.05$) entre EXT y FLEX. b: Significativamente ($P<0.05$) diferente del Pre-EXT. c: Significativamente ($P<0.05$) diferente del Pre-FLEX.

Capítulo 4: Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos en nuestro estudio, el nuevo ejercicio excéntrico en cicloergómetro enfocado a la musculatura flexora de rodilla consume 23% más de oxígeno, muestra un 13,7% mayor frecuencia cardiaca promedio y resulto en 17,9% mayor percepción del esfuerzo (RPE) en comparación al ejercicio excéntrico enfocado a los extensores de rodilla (EXT) a una misma carga (~ 60% PO_{máx} concéntrica). Esto demuestra un mayor gasto metabólico y estrés cardiovascular sistémico cuando el ejercicio excéntrico es enfocado a los FLEX en comparación con los EXT. En relación a los marcadores indirectos de daño muscular, el ejercicio excéntrico en cicloergómetro reduce la función del músculo como lo muestra la disminución de la potencia en el salto tanto en EXT y FLEX confirmando los descubrimientos de estudios previos sobre daño muscular inducido por ejercicio excéntrico (3), aunque no existió diferencia significativa entre grupos en relación al salto CMJ ni SJ. Como era de esperar, 30 min de cicloergómetro excéntrico tanto para EXT como en FLEX indujeron DOMS sin mayores diferencias entre condiciones, además esto fue acompañado de disminuciones en el ROM de extremidad inferior en ambos grupos. Esto pone en entredicho nuestra hipótesis que el gasto metabólico y daño muscular seria mayor para el grupo de los FLEX en comparación a EXT luego de un ejercicio en cicloergómetro excéntrico. Esto ya que se cumple solo parcialmente nuestra hipótesis debido a que solo el estrés metabólico es mayor en FLEX y no así el daño muscular, el cual fue similar para ambos grupos. A continuación se discutirán los hallazgos encontrados en el presente estudio para las variables de gasto metabólico y daño muscular inducidos por un ejercicio en cicloergómetro excéntrico.

Parámetros metabólicos

En estudios realizados previamente se han reportado principalmente diferencias entre el ejercicio en cicloergómetro excéntrico y concéntrico, en donde se ha observado que el ejercicio excéntrico requiere solo de un 50% del oxígeno que consume un ejercicio concéntrico a la misma intensidad de trabajo (3, 54) y que además, la frecuencia cardiaca es un 20-30% menor y el RPE un 22% menor en comparación al ejercicio concéntrico (3, 55). Sin embargo, no existen estudios que aporten información sobre el comportamiento de los parámetros metabólicos para un ejercicio en cicloergómetro excéntrico enfocado en los músculos flexores de rodilla. Nuestros resultados muestran que el consumo de oxígeno en el ejercicio excéntrico enfocado a los FLEX fue 23% mayor, la FC fue un 14% más elevada y el RPE fue un 18% mayor que en EXT (Figura 10). Así, analizando estos datos se puede observar que en nuestro estudio el gasto metabólico de los FLEX de rodilla fue significativamente mayor que el de los EXT. Nosotros especulamos que la diferencia del gasto metabólico entre FLEX y EXT se le pudo haber debido a: 1) las diferencias en la composición muscular de cada grupo muscular, en relación al tipo de fibra muscular y el área de sección transversal, 2) requerimiento de estos músculos a las contracciones excéntricas en actividades de la vida diaria y 3) el protocolo de ejercicio utilizado en el presente estudio.

Las diferencias en la composición muscular de EXT y FLEX podrían explicar las diferencias encontradas en los parámetros metabólicos. En relación a esto, Garret y cols (56) reportaron que la composición muscular de los FLEX era más abundante en fibras tipo II (Tipo I: 45%, Tipo II: 55% aproximadamente), en cambio los EXT presentaban la misma cantidad de fibras tipo I y II (Tipo I: 50%, Tipo II: 50%). Por lo tanto, teniendo en cuenta que las fibras tipo I (oxidativas) soportan más una carga repetitiva, debido a su mayor resistencia a la fatiga y capacidad de consumo máximo de oxígeno, en relación a las fibras tipo II (anaeróbicas), podríamos especular que la diferencia en la composición muscular influyó el mayor consumo de oxígeno por parte de los FLEX debido a su menor cantidad de fibras tipo I. Sin embargo, en el presente estudio no se realizaron

biopsias musculares, por lo tanto, no se conoce la composición muscular exacta de los sujetos que participaron, por lo tanto, es difícil especular que es similar a la encontrada por Garret y cols. Así, al revisar otros estudios los resultados fueron contradictorios en relación a la composición muscular de EXT y FLEX ya que se han reportado mayores cantidades de fibras tipo I en los FLEX (Tipo I: 60%, Tipo II: 40%) y más fibras tipo II en EXT (Tipo I: 40%, Tipo II: 60%) (57). A esto hay que sumarle que la composición muscular varía para cada participante por distintos factores, como la raza, edad, sexo y nivel de actividad deportiva de cada individuo. Otro factor que podría haber aumentado el gasto metabólico de los FLEX es el tamaño (masa muscular) de cada grupo muscular. Overend y cols (58) mostraron que los FLEX tienen un 48% menos de masa muscular que los EXT, en este caso el cuádriceps, tiene una mayor tolerancia a la fatiga que músculos de menor tamaño como lo muestra Shimano y cols, en donde dos grupos de nueve sujetos entrenados y nueve no entrenados, realizaron la máxima cantidad de repeticiones para los ejercicios de press de banca, curl de bíceps y sentadilla, todos estos al 75%, 85% y 95% de su 1RM respectivo para cada ejercicio. Los resultados demostraron que para ambos grupos la mayor cantidad de repeticiones fueron realizadas en la sentadilla al 75% y 85% de 1RM, en donde concluyeron que la cantidad de repeticiones que se pueden realizar a distintas intensidades de 1RM, son dependientes de la cantidad de masa muscular que se involucre en el ejercicio (59). Así, es posible que alguno o todos estos factores pudieran explicar el mayor gasto metabólico inducido por el ejercicio excéntrico en los FLEX. Sin embargo, desconocemos el área de sección transversal muscular de los participantes del presente estudio, pero generalmente la musculatura EXT es de mayor tamaño que los FLEX (60, 61).

También es posible que la diferencia en la frecuencia diaria de contracciones excéntricas a la que es sometido cada grupo muscular genere un mayor efecto protector sobre la musculatura de los EXT y de alguna manera este más preparada para enfrentarse a un ejercicio excéntrico, este efecto protector es conocido como el efecto en dosis repetidas (12, 16, 31, 44). Otra cualidad que genera el trabajo excéntrico es el aumento de la rigidez del tejido conectivo, lo que

hace al musculo más eficiente en la transmisión de la fuerza (67), por lo que la musculatura EXT al recurrir con mayor frecuencia a las contracciones excéntricas, presentaría una mayor rigidez del tejido conectivo que la hace más eficiente a este tipo de trabajo (Eficiencia mecánica). La poca costumbre de la musculatura FLEX a las contracciones excéntricas diarias en sujetos no entrenados podría explicar el aumento del gasto metabólico debido a un menor efecto protector y una menor rigidez del tejido conectivo.

Otra posible causa del mayor gasto metabólico por parte de los FLEX puede ser el protocolo de ejercicio utilizado en este estudio. Esto debido principalmente a la dificultad en la ejecución del ejercicio en el cicloergómetro excéntrico cuando es adaptado para los FLEX en comparación a los EXT. Es importante recapitular que para ambas sesiones de ejercicio, hubo un periodo de familiarización de 5 minutos previo a los 30 minutos de entrenamiento en cicloergómetro excéntrico. De forma anecdótica podemos comentar que para la sesión de EXT todos los sujetos lograron coordinar y entender el ejercicio de forma correcta resistiendo el movimiento hacia atrás de los pedales. Sin embargo, esto no fue así para los FLEX, en donde durante la familiarización los sujetos mostraron una gran dificultad para lograr una correcta coordinación, llevándolos a compensar con musculatura EXT para mantener la intensidad requerida. Esto se puede deber a que la musculatura FLEX no acostumbra a realizar este tipo de contracciones en el día a día, además del hecho a que los sujetos están acostumbrados a asistir el movimiento de los pedales hacia anterior y no a resistir este movimiento. Sin embargo, esto es solo una especulación debido a que no realizamos ninguna medición de actividad muscular (ej. Electromiografía) o torque instantáneo (Nm) durante el ejercicio. Podríamos especular que durante la sesión de ejercicio en el cicloergómetro excéntrico para FLEX, los sujetos utilizaron tanto musculatura flexora como extensora de rodilla y cadera de forma compensatoria para mantener la intensidad del ejercicio requerido, lo que pudo haber aumentado el consumo de oxígeno, frecuencia cardiaca y RPE durante esta sesión de ejercicio. Futuras investigaciones podrían incluir mediciones de actividad muscular y coordinación a través de electromiografía, para conocer el nivel de actividad y

reclutamiento muscular utilizado durante una sesión de ejercicio en el cicloergómetro excéntrico para FLEX. También esta herramienta podría ser utilizada como un feedback visual durante el ejercicio, para ayudar al sujeto a coordinarse y saber si está reclutando la musculatura isquiotibial y no compensando a través de la musculatura extensora de rodilla.

Daño muscular

Varios estudios han reportado que el cicloergómetro excéntrico induce un daño muscular significativo cuando es utilizada en el grupo extensor de rodilla (3, 62, 63). Los resultados de nuestro estudio revelaron que hubo una disminución de la función muscular evidenciada en una reducción del 9% la potencia máxima concéntrica en el CMJ para la sesión de EXT. Estos resultados del CMJ fueron similares a los encontrados por Peñailillo y cols (3), en donde se realizó un protocolo de ejercicio de cicloergómetro excéntrico para los EXT (60% P_Omáx durante 30 minutos). Al comparar nuestros resultados de función muscular, no encontramos diferencias significativas entre EXT y FLEX, evidenciando que el daño muscular inducido fue similar para ambos grupos musculares. Es necesario destacar que las pruebas de salto no son la mejor herramienta para evaluar la función aislada de la musculatura flexora de extremidad inferior, ya que se ha reportado que la activación muscular es de un 13% en los isquiotibiales (FLEX), un 64% en cuádriceps y 66% glúteo mayor (EXT) del 100% de fibras de cada músculo (64). Por esto, la disminución en la potencia de salto para el grupo FLEX evidenciada en nuestro estudio se puede deber a la co-contracción de musculatura extensora de rodilla durante el ejercicio excéntrico. Solo dos estudios han comparado el daño muscular entre FLEX y EXT inducido por ejercicio excéntrico, en donde ambos realizaron una modalidad de entrenamiento en base a contracciones isocinéticas máximas. Franklin y cols (65) encontraron un aumento significativo del CK plasmático 23 veces mayor en los FLEX en relación a los EXT (6037 y 261 IU/L, respectivamente) y un DOMS 4,5 veces mayor para los FLEX en relación a los EXT (4.1 y 0.9, respectivamente), posterior a realizar tres series de 35 contracciones excéntricas isocinéticas ($120^{\circ}\cdot s^{-1}$). Similares resultados fueron

los encontrados por Chen y cols (66) posterior a cinco series de seis contracciones excéntricas isocinéticas ($90^{\circ}\cdot s^{-1}$) maximales, donde reportaron que los cambios en la fuerza muscular (-70%), ROM (-50%), perímetro muscular (+40%) y Mb (+60%) fueron también significativamente diferentes para los FLEX en relación a los EXT. Sin embargo, en todos los estudios que han utilizado el cicloergómetro excéntrico, se ha utilizado de tal manera que el trabajo muscular se ha enfocado en el grupo extensor de las extremidades inferiores, es decir, el sentido de los pedales del cicloergómetro es hacia posterior mientras el sujeto resiste la flexión de rodilla. Por lo tanto este es el primer estudio en enfocar esta modalidad de entrenamiento excéntrico hacia la musculatura flexora y comparar el daño muscular y gasto metabólico con la musculatura extensora de extremidad inferior.

Al analizar el PPT (Figura 13) podemos observar disminuciones significativas en ambos grupos musculares dependiendo del enfoque del cicloergómetro. Así, luego de la sesión de FLEX el BF disminuyó un 19% y el VL un 17%, no así en la sesión para EXT donde solo hubo una disminución significativa en los músculos EXT de rodilla (ej. BF: 3%, VL: 43%). Además, podemos observar que para cada sesión de ejercicio de cicloergómetro excéntrico, los músculos que debían ejercer el trabajo se vieron más afectados (cuádriceps para la sesión EXT e isquiotibiales para la sesión FLEX). Sin embargo, no encontramos diferencias significativas entre grupos debido posiblemente al pequeño número de participantes de nuestro estudio. Por lo tanto, recomendamos en futuras investigaciones realizarlas con un mayor número de participantes, ya que en el presente estudio se observó una clara tendencia a un daño muscular mayor en la musculatura que debía ejercer la resistencia al movimiento de los pedales, pero que no llegó a ser significativa entre FLEX y EXT posiblemente por el pequeño número de participantes.

La rigidez muscular es otra variable que ha sido vastamente estudiada para evidenciar el daño muscular. Se ha reportado que luego de una sesión de ejercicio excéntrico la rigidez muscular aumenta y esto produce una disminución en el ROM de la articulación en la cual interfieren los músculos sometidos a contracciones

excéntricas (36, 37, 40, 66). En nuestro estudio observamos que el ejercicio excéntrico produjo un aumento en la rigidez muscular tanto para FLEX como EXT respectivo a la modalidad realizada. Esto es un hallazgo similar a lo encontrado por Chen y cols (66) donde la pérdida en el ROM fue de un 50% mayor para los FLEX ($4^\circ \pm 1^\circ$) en relación a los EXT ($2^\circ \pm 1^\circ$). Cabe destacar que el método de evaluación de la rigidez muscular utilizada en nuestro estudio fue realizado a través de diferentes pruebas que día a día son utilizadas por los kinesiólogos para evaluar la flexibilidad muscular, por lo que la mayoría de las pruebas eran de un método pasivo asistido (por los evaluadores), lo que puede generar cierto margen de error, no así en otros estudios donde evaluaron la rigidez muscular a través de dispositivos mecánicos de resistencia mecánica (39). Es importante señalar lo anterior, ya que la prueba Active Knee Extension (AKE) requiere la extensión activa de rodilla, es decir, realizadas por el propio sujeto, los cuales realizaron su máximo esfuerzo, por lo que la sensibilidad de esta prueba podría haber sido mucho mayor que las que requerían la participación del evaluador como lo es por ejemplo la prueba SLR, donde el evaluador puede que no identifique correctamente el máximo del sujeto, alterando los resultados. Analizando los datos de esta prueba podemos ver que la disminución del ROM fue significativa entre ambos grupos, siendo mayor la pérdida del ROM luego de la sesión de los FLEX (Figura 14). El ROM se ve disminuido producto de la rigidez muscular generada por el ejercicio excéntrico, en donde este se ha visto que produce un aumento en la rigidez del tejido conectivo a nivel muscular (16).

El cicloergómetro excéntrico ha mostrado ser una herramienta útil para la rehabilitación y aumento del rendimiento deportivo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que someter a cualquier paciente a esta modalidad de ejercicio, existe la probabilidad de inducir daño muscular, pero esto, no debe ser un impedimento para establecer y usarla en un protocolo de tratamiento, ya que a partir de la segunda sesión en el cicloergómetro, el daño muscular inducido por ejercicio excéntrico se atenúan y disminuyen significativamente. Esta adaptación ha sido ampliamente descrita, donde el musculo sufre una adaptación al ejercicio excéntrico disminuyendo el daño muscular y DOMS a partir de la segunda sesión

(16). Para un programa de entrenamiento en deportistas ocurre lo mismo, por lo que hay que tener en consideración estos efectos agudos y recomendamos no realizar las primeras sesiones de ejercicios cercanos a una competencia deportiva, ya que estos efectos agudos pueden ser perjudiciales para el rendimiento del deportista y exponerle a una posible lesión, debido a la disminución de la función muscular.

Conclusión

En conclusión, el ejercicio en el cicloergómetro excéntrico para los FLEX requiere una mayor demanda metabólica en relación a los EXT, quedando reflejado por un mayor consumo de oxígeno, un mayor incremento en la FC y un RPE mayor en la sesión de cicloergómetro excéntrico de los FLEX. Además, el cicloergómetro excéntrico a un 60% de su $PO_{m\acute{a}x}$ produce un daño muscular moderado, que si bien afecto de distinta forma a cada grupo muscular, fue debido a que tanto EXT como FLEX se trabajaron de forma aislada. En cuanto a la magnitud del daño muscular podemos decir que no hubo diferencias significativas entre ambos grupos musculares. Por lo tanto, el daño muscular que se indujo en isquiotibiales no debería ser un impedimento para entrenar esta musculatura a través del cicloergómetro excéntrico, pudiendo ser una buena herramienta a utilizar para lograr aumentos en la fuerza y masa muscular de los isquiotibiales, ya sea en rehabilitación, acondicionamiento o prevención de lesiones. Hoy en día, los kinesiólogos se enfrentan diariamente a todo tipo de pacientes, por lo que el cicloergómetro excéntrico es una herramienta que puede ser utilizada por una variedad de pacientes con distintas patologías respiratorias, neurológicas y en el adulto mayor. Es necesario futuras investigaciones con un número mayor de participantes para que los datos recolectados tengan un mayor poder estadístico y aplicable a una población mayor, además de observar cómo se comporta la musculatura FLEX al ser entrenada a otras intensidades. También es recomendable buscar una solución a la coordinación deficiente al realizar un ejercicio para la musculatura de los FLEX en esta modalidad de entrenamiento como lo podría ser a través del uso de electromiografía.

Limitaciones

Las limitaciones con las que nos encontramos durante el desarrollo del presente estudio son, en primer lugar, la falta de estudios que se han realizado en cicloergómetro excéntrico modificado para los isquiotibiales ya que toda la literatura habla sobre el cicloergómetro excéntrico para cuádriceps, por lo que no se podrá comparar mediante otros estudios la veracidad de los resultados. En segundo lugar está el faltar a una de las evaluaciones pactadas por parte del sujeto. Otra limitación presente en el estudio es la dificultad del participante para coordinación y resistir el movimiento de los pedales. Que el sujeto no de su máximo esfuerzo, tanto en el cicloergómetro como en las evaluaciones a realizar, o que a pesar de que lo realice no logre mantener el promedio a mantener en watts durante el pedaleo también es considerado como una limitación y por último el bajo número de participantes en el estudio.

Bibliografía

1. Abbott BC, Bigland B, Ritchie JM. The physiological cost of negative work. *J Physiol.* 1952;117(3):380-90.
2. LaStayo PC, Ewy GA, Pierotti DD, Johns RK, Lindstedt S. The positive effects of negative work: increased muscle strength and decreased fall risk in a frail elderly population. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2003;58(5):419-24.
3. Penailillo L, Blazevich A, Numazawa H, Nosaka K. Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45(9):1773-81.
4. Hill AV. Length of muscle, and the heat and tension developed in an isometric contraction. *J Physiol.* 1925;60(4):237-63.
5. Jonhagen S, Ackermann P, Saartok T. Forward lunge: a training study of eccentric exercises of the lower limbs. *J Strength Cond Res.* 2009;23(3):972-8.
6. Chen TC, Nosaka K, Wu CC. Effects of a 30-min running performed daily after downhill running on recovery of muscle function and running economy. *J Sci Med Sport.* 2008;11(3):271-9.
7. Arnason A, Andersen TE, Holme I, Engebretsen L, Bahr R. Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18(1):40-8.
8. Wright GAD, Thomas H, Gehlsen G. Electromyographic Activity of the Hamstrings During Performance of the Leg Curl, Stiff-Leg Deadlift, and Back Squat Movements. *J Strength Cond Res.* 1999;13(2): 168-174

9. Gross M, Luthy F, Kroell J, Muller E, Hoppeler H, Vogt M. Effects of eccentric cycle ergometry in alpine skiers. *Int J Sports Med.* 2010;31(8):572-6.
10. LaStayo PC, Pierotti DJ, Pifer J, Hoppeler H, Lindstedt SL. Eccentric ergometry: increases in locomotor muscle size and strength at low training intensities. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2000;278(5):R1282-8.
11. Lastayo P, Marcus RL, Dibble L, Frajacomo F, Lindstedt SL. Eccentric Exercise in Rehabilitation: Safety, Feasibility and Application. *J Appl Physiol.* 2014. 116(11): 1426-34.
12. Chen TC, Chen HL, Lin MJ, Wu CJ, Nosaka K. Muscle damage responses of the elbow flexors to four maximal eccentric exercise bouts performed every 4 weeks. *Eur J Appl Physiol.* 2009;106(2):267-75.
13. Kanda K, Sugama K, Hayashida H, Sakuma J, Kawakami Y, Miura S, et al. Eccentric exercise-induced delayed-onset muscle soreness and changes in markers of muscle damage and inflammation. *Exerc Immunol Rev.* 2013;19:72-85.
14. Natreba AI, Popov DV, Tsvirkun DV, Vinogradova OL. [Acute effects of eccentric work on a bicycle ergometer]. *Biofizika.* 2008; 53(6):1138-43.
15. Howatson G, van Someren KA. Evidence of a contralateral repeated bout effect after maximal eccentric contractions. *Eur J Appl Physiol.* 2007;101(2):207-14.
16. McHugh MP. Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: the protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports.* 2003;13(2):88-97.

17. Mjolsnes R, Arnason A, Osthagen T, Raastad T, Bahr R. A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring strength training in well-trained soccer players. *Scand J Med Sci Sports*. 2004;14(5):311-7.
18. Orchard J, Seward H. Epidemiology of injuries in the Australian Football League, seasons 1997-2000. *Br J Sports Med*. 2002; 36(1):39-44.
19. Schache A. Eccentric hamstring muscle training can prevent hamstring injuries in soccer players. *J Physiother*. 2012; 58(1):58.
20. Schmitt B, Tim T, McHugh M. Hamstring injury rehabilitation and prevention of reinjury using lengthened state eccentric training: a new concept. *Int J Sports Phys Ther*. 2012;7(3):333-41.
21. Asmussen E. Positive and negative muscular work. *Acta Physiol Scand*. 1953; 28(4):364-82.
22. Gerber JP, Marcus RL, Dibble LE, Greis PE, Burks RT, LaStayo PC. Effects of early progressive eccentric exercise on muscle size and function after anterior cruciate ligament reconstruction: a 1-year follow-up study of a randomized clinical trial. *Phys Ther*. 2009; 89(1):51-9.
23. Roig M, Shadgan B, Reid WD. Eccentric exercise in patients with chronic health conditions: a systematic review. *Physiother Can*. 2008;60(2):146-60.
24. Clark DJ, Patten C. Eccentric versus concentric resistance training to enhance neuromuscular activation and walking speed following stroke. *Neurorehabil Neural Repair*. 2013; 27(4):335-44.
25. Hyldahl RD, Hubal MJ. Lengthening our perspective: morphological, cellular, and molecular responses to eccentric exercise. *Muscle Nerve*. 2014; 49(2):155-70.

26. Isner-Horobeti ME, Dufour SP, Vautravers P, Geny B, Coudeyre E, Richard R. Eccentric exercise training: modalities, applications and perspectives. *Sports Med.* 2013; 43(6):483-512.
27. Nosaka K, Newton M. Concentric or eccentric training effect on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med Sci Sports Exerc.* 2002; 34(1):63-9.
28. Neme Ide B, Alessandro Soares Nunes L, Brenzikofer R, Macedo DV. Time course of muscle damage and inflammatory responses to resistance training with eccentric overload in trained individuals. *Mediators Inflamm.* 2013; (2013): 6.
29. Miliadis GA, Nomikos T, Fragopoulou E, Athanasopoulos S, Antonopoulou S. Effects of eccentric exercise-induced muscle injury on blood levels of platelet activating factor (PAF) and other inflammatory markers. *Eur J Appl Physiol.* 2005; 95(5-6):504-13.
30. Connolly DA, Sayers SP, McHugh MP. Treatment and prevention of delayed onset muscle soreness. *J Strength Cond Res.* 2003; 17(1):197-208.
31. Smith LL, Fulmer MG, Holbert D, McCammon MR, Houmard JA, Frazer DD, et al. The impact of a repeated bout of eccentric exercise on muscular strength, muscle soreness and creatine kinase. *Br J Sports Med.* 1994; 28(4):267-71.
32. Downie WW, Leatham PA, Rhind VM, Wright V, Branco JA, Anderson JA. Studies with pain rating scales. *Ann Rheum Dis.* 1978; 37(4):378-81.
33. Allen DG. Eccentric muscle damage: mechanisms of early reduction of force. *Acta Physiol Scand.* 2001; 171(3):311-9.

34. Fernandez-Gonzalo R, Lundberg TR, Alvarez-Alvarez L, de Paz JA. Muscle damage responses and adaptations to eccentric-overload resistance exercise in men and women. *Eur J Appl Physiol.* 2014; 114(5):1075-84.
35. Clarkson PM, Nosaka K, Braun B. Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med Sci Sports Exerc.* 1992; 24(5):512-20.
36. Jamurtas AZ, Theocharis V, Tofas T, Tsiokanos A, Yfanti C, Paschalis V, et al. Comparison between leg and arm eccentric exercises of the same relative intensity on indices of muscle damage. *Eur J Appl Physiol.* 2005; 95(2-3):179-85.
37. Howell JN, Chleboun G, Conatser R. Muscle stiffness, strength loss, swelling and soreness following exercise-induced injury in humans. *J Physiol.* 1993; 464:183-96.
38. Chen CH, Nosaka K, Chen HL, Lin MJ, Tseng KW, Chen TC. Effects of flexibility training on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med Sci Sports Exerc.* 2011; 43(3):491-500.
39. McHugh MP, Connolly DA, Eston RG, Kremenec IJ, Nicholas SJ, Gleim GW. The role of passive muscle stiffness in symptoms of exercise-induced muscle damage. *Am J Sports Med.* 1999; 27(5):594-9.
40. Janecki D, Jarocka E, Jaskolska A, Marusiak J, Jaskolski A. Muscle passive stiffness increases less after the second bout of eccentric exercise compared to the first bout. *J Sci Med Sport.* 2011; 14(4):338-43.
41. Klossner S, Dapp C, Schmutz S, Vogt M, Hoppeler H, Fluck M. Muscle transcriptome adaptations with mild eccentric ergometer exercise. *Pflugers Arch: Eur J Appl Physiol.* 2007; 455(3):555-62.

42. Evans WJ, Meredith CN, Cannon JG, Dinarello CA, Frontera WR, Hughes VA, et al. Metabolic changes following eccentric exercise in trained and untrained men. *J Appl Physiol* (1985). 1986; 61(5):1864-8.
43. Hameed M, Toft AD, Pedersen BK, Harridge SD, Goldspink G. Effects of eccentric cycling exercise on IGF-I splice variant expression in the muscles of young and elderly people. *Scand J Med Sci Sports*. 2008; 18(4):447-52.
44. Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. How long does the protective effect on eccentric exercise-induced muscle damage last? *Med Sci Sports Exerc*. 2001; 33(9):1490-5.
45. Hedayatpour N, Falla D. Non-uniform muscle adaptations to eccentric exercise and the implications for training and sport. *J Electromyogr Kinesiol*. 2012; 22(3):329-33.
46. Penailillo L, Blazevich A, Nosaka K. Energy expenditure and substrate oxidation during and after eccentric cycling. *Eur J Appl Physiol*. 2014. 114(4):805-14.
47. Leong CH, McDermott WJ, Elmer SJ, Martin JC. Chronic eccentric cycling improves quadriceps muscle structure and maximum cycling power. *Int J Sports Med*. 2014; 35(7):559-65.
48. Petersen J, Holmich P. Evidence based prevention of hamstring injuries in sport. *Br J Sports Med*. 2005; 39(6):319-23.
49. Guex K, Millet GP. Conceptual framework for strengthening exercises to prevent hamstring strains. *Sports Med*. 2013; 43(12):1207-15.

50. Askling C, Karlsson J, Thorstensson A. Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scand J Med Sci Sports*. 2003; 13(4):244-50.
51. Kaminski TW, Wabbersen CV, Murphy RM. Concentric versus enhanced eccentric hamstring strength training: clinical implications. *J Athl Train*. 1998; 33(3):216-21.
52. Brockett CL, Morgan DL, Proske U. Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. *Med Sci Sports Exerc*. 2001; 33(5):783-90.
53. Nichols AW. Does eccentric training of hamstring muscles reduce acute injuries in soccer? *Clin J Sport Med*. 2013; 23(1):85-6.
54. Knuttgen HG, Patton JF, Vogel JA. An ergometer for concentric and eccentric muscular exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1982; 53(3):784-8.
55. Dufour SP, Lampert E, Doutreleau S, Lonsdorfer-Wolf E, Billat VL, Piquard F, et al. Eccentric cycle exercise: training application of specific circulatory adjustments. *Med Sci Sports Exerc*. 2004; 36(11):1900-6.
56. Garrett WE, Jr., Califf JC, Bassett FH, 3rd. Histochemical correlates of hamstring injuries. *Am J Sports Med*. 1984; 12(2):98-103.
57. Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci*. 1973; 18(1):111-29.

58. Overend TJ, Cunningham DA, Kramer JF, Lefcoe MS, Paterson DH. Knee extensor and knee flexor strength: cross-sectional area ratios in young and elderly men. *J Gerontol.* 1992; 47(6):M204-10.
59. Shimano T, Kraemer WJ, Spiering BA, Volek JS, Hatfield DL, Silvestre R, et al. Relationship between the number of repetitions and selected percentages of one repetition maximum in free weight exercises in trained and untrained men. *J Strength Cond Res.* 2006; 20(4):819-23.
60. Overend TJ, Cunningham DA, Paterson DH, Lefcoe MS. Thigh composition in young and elderly men determined by computed tomography. *Clin Physiol.* 1992; 12(6):629-40.
61. Wickiewicz TL, Roy RR, Powell PL, Edgerton VR. Muscle architecture of the human lower limb. *Clin Orthop Relat Res.* 1983; (179):275-83.
62. Asp S, Dugaard JR, Richter EA. Eccentric exercise decreases glucose transporter GLUT4 protein in human skeletal muscle. *J Physiol.* 1995; 482(Pt 3):705-12.
63. Toft AD, Jensen LB, Bruunsgaard H, Ibfelt T, Halkjaer-Kristensen J, Febbraio M, et al. Cytokine response to eccentric exercise in young and elderly humans. *Am J Physiol Cell Physiol.* 2002; 283(1):C289-95.
64. Sugisaki N, Kurokawa S, Okada J, Kanehisa H. Difference in the recruitment of hip and knee muscles between back squat and plyometric squat jump. *PLoS One.* 2014; 9(6).
65. Franklin ME, Chamness MS, Chenier TC, Mosteller GC, Barrow LA. A Comparison of Isokinetic Eccentric Exercise on Delayed-Onset Muscle Soreness and Creatine Kinase in the Quadriceps Versus the Hamstrings. *Isokinetics and Exercise Science.* 1993; 3(2):68-73.

66. Chen TC, Lin KY, Chen HL, Lin MJ, Nosaka K. Comparison in eccentric exercise-induced muscle damage among four limb muscles. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(2):211-23.
67. Bojsen-Moller J, Magnusson SP, Rasmussen LR, Kjaer M, Aagaard P. Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *J Appl Physiol.* 2005; 99(3):986-94.
68. Gajdosik R, Lusin G. Hamstring muscle tightness. Reliability of an active-knee-extension test. *Physical therapy.* 1983; 63(7):1085-90.
69. Hermens H, Freriks B. Seniam.org [Internet]. Netherlands: Roessingh Research and Development. [citado 11 de Abril, 2014]. Disponible en: http://seniam.org/leg_location.htm

Anexos

Anexo N°1 Consentimiento informado



Información al participante

Muchas gracias por mostrar interés en participar en este estudio. El propósito de este documento es explicar en qué consiste el proyecto de investigación del que va hacer parte. Tómese el tiempo de leer y comprender claramente la información explicada a continuación, si le surge alguna pregunta no dude en preguntarla a los investigadores a cargo de proyecto.

Proyecto para optar a la tesis de licenciado en kinesiología “Diferencias en el daño muscular y estrés metabólico entre los músculos extensores y flexores de rodilla inducidos por un ejercicio en cicloergómetro excéntrico”

Investigadores

Este proyecto de investigación es requisito para optar al grado de licenciado en kinesiología en la Universidad Finis Terrae (Chile)

Candidatos a título: José Ignacio Cangas (jicangas@gmail.com)

Nicolás Guzmán (nguzmanw@hotmail.com)

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

Antecedentes de investigación

Las contracciones excéntricas son realizadas cuando el musculo genera tensión a medida que se alarga (descender un peso lentamente), en oposición a la contracción concéntrica donde el musculo se acorta (levantar un peso). Contracciones excéntricas son realizadas durante las actividades de la vida diaria como lo es bajar las escaleras o sentarse en una silla. La acción de descender un peso y bajar una pendiente corriendo o caminando son usados como modelos de estudio del ejercicio excéntrico. El cicloergómetro excéntrico es un nuevo método para realizar ejercicio excéntrico, y está comenzando a hacerse popular.

Durante el pedaleo excéntrico los extensores de rodilla realizan fuerza mientras resisten una rotación posterior de los pedales del cicloergómetro, lo que genera un aumento en la longitud del musculo mientras este está contraído, lo que llamamos ejercicio excéntrico.

Una consecuencia en particular del ejercicio excéntrico es el daño y dolor muscular. Como sea, cuando el ejercicio es realizado por segunda vez un par de semanas después del primer intento, el dolor y daño muscular es menor. Por otro lado, el entrenamiento en el cicloergómetro excéntrico ha demostrado beneficios en el control de la glicemia e incrementos en el metabolismo corporal. Los efectos agudos después del ejercicio excéntrico como el daño muscular han demostrado que impide la acción de la insulina. Además, el aumento en el metabolismo corporal puede estar relacionado con el proceso de recuperación después del daño muscular inducido por el ejercicio excéntrico. A pesar de esto, no hay estudios que hayan investigado el perfil del daño muscular después de un ejercicio excéntrico repetitivo y como el daño muscular está relacionado a la acción de la insulina y el metabolismo corporal.

Propósito del estudio

El propósito de este estudio es comparar la magnitud de extensión del daño muscular y el estrés metabólico generado por el ejercicio excéntrico en extensores y flexores de rodilla luego de ser sometidos a una sesión de cicloergómetro excéntrico a una misma intensidad con dos semanas de separación para cada grupo muscular. Por eso, en este estudio vamos a investigar:

1. Comparar el daño muscular generado luego una sesión de entrenamiento de cicloergómetro excéntrico entre extensores y flexores de rodilla.
2. Comparar el estrés metabólico que se produce en el participante al ser sometido a una sesión de cicloergómetro excéntrico para cada grupo muscular.

Requisitos para participar

Para participar en el estudio su edad deber estar entre los 18 y 32 años, no debe presentar ninguna lesión musculo esquelética en extremidades inferiores y no haber realizado ningún tipo de ejercicio de alta intensidad o resistencia muscular de extremidad inferior en los últimos 6 meses (de manera regular). Se le invitara a responder un cuestionario medico el cual nos permitirá conocer su condición física y de salud actual. Una vez que cumpla todos estos requisitos podrá participar en el estudio.

Requerimientos

Se le solicitara presentarse en el laboratorio de ciencias del ejercicio ubicado en el 5to piso del edificio Amberes (A504) de la Universidad Finis Terrae en primera instancia para una sesión de familiarización por lo menos 48 hrs antes de la primera sesión de ejercicio en el cicloergómetro. En esta sesión se realizara la prueba de consumo de oxigeno máximo ($VO_{2m\acute{a}x}$) en un cicloergómetro reclinado, prueba la que también nos entregara su potencia máxima concéntrica ($PO_{m\acute{a}x}$) para determinar la intensidad de los ejercicios. El día 0 será considerado el día

inicial, el cual será un día lunes o martes, luego los días 1-4 se realizarán mediciones en el laboratorio donde requeriremos aproximadamente 30 minutos para realizarlas. Una vez completado el primer protocolo al día 4 se dejara la semana siguiente de descanso para la siguiente a esta volver a repetir el mismo protocolo. Se requiere que al presentarse en el laboratorio lo haga con zapatillas y shorts.

Procedimiento

En el presente estudio se buscara generar un estrés metabólico y daño muscular mediante una sesión de ejercicio con el cicloergómetro excéntrico a una intensidad determinada y constante. El cicloergómetro excéntrico será utilizada para trabajar tanto los grupos musculares del compartimento flexor (isquiotibiales) y extensor (cuádriceps) de rodilla. Se realizaran 2 sesiones de entrenamiento de 30 minutos de duración a una intensidad del 60% de su $PO_{máx}$ con 2 semanas de separación, cada sesión trabajara un grupo muscular en particular. Posterior a estas pruebas es posible que experimente mareos, fatiga y/o dolor muscular. Si usted no logra terminar los 30 minutos de entrenamiento deberá ser excluido de la investigación.

El día del primer ejercicio en cicloergómetro excéntrico (día 0) se realizaran distintas mediciones previo e inmediatamente posterior al ejercicio, luego los días 1 a 4 posterior al ejercicio. Este mismo protocolo se repetirá 2 semanas después de la primera sesión en cicloergómetro, solamente cambiaremos el grupo muscular a trabajar.

Protocolo

| Lunes | Martes * | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
|-------------|----------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| Día 0 | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | | |
| Día 7 | | | | | | |
| BEX1 MED | MED | MED | MED | MED | LIBRE | LIBRE |
| LIBRE | LIBRE | LIBRE | LIBRE | LIBRE | LIBRE | LIBRE |
| BEX2 MED | MED | MED | MED | MED | LIBRE | LIBRE |

BEX1= Primera sesión de cicloergómetro excéntrico (Cuádriceps)

BEX2= Segunda sesión de cicloergómetro excéntrico (Isquiotibiales)

MED= Mediciones de salto vertical, flexibilidad, dolor muscular y muestra de sangre

() Si la evaluación inicial se realiza un martes el protocolo se corre un día y se evalúa los días sábado.*

Medidas a tomar

Salto vertical: Usted deberá realizar dos tipos de saltos sobre una plataforma de fuerza la cual nos entrega datos como la potencia máxima que ejerce en cada salto y el tiempo de suspensión en el aire que logra en cada uno. Las pruebas de salto serán explicadas detalladamente durante la evaluación y requerimos de su mayor atención y esfuerzo al momento de realizarla.

Flexibilidad: A través de distintas pruebas de flexibilidad muscular (elongación), vamos a cuantificar el rango de movimiento (ROM) para los grupos musculares extensores y flexores de rodilla. Dolor muscular

Dolor muscular: Para lograr cuantificar el dolor muscular vamos a realizar una prueba de umbral del dolor a la presión mediante un instrumento llamado algómetro, el cual aplica una presión controlada. A usted se le solicitará indicar el

momento en el cual perciba dolor. Se tomaran 3 medidas en puntos específicos de cada grupo muscular con un intervalo de 30 segundos entre cada una.

Otra de las formas en la cual cuantificaremos el dolor muscular, será a través de una escala visual análoga (EVA), la que consiste en una escala de 100 mm, en donde 0 refiere que no existe dolor alguno y 100 que indica el peor dolor que usted ha experimentado en su vida. Deberá marcar la escala en el punto en el que represente su dolor (en otras palabras, ponerle una nota al dolor), cuantificaremos su sensación de dolor con la EVA al momento de bajar escaleras, una prueba de elongación muscular y durante las pruebas de salto previamente explicadas.

Consideraciones de las pruebas

Antes de cualquier prueba en el cicloergómetro excéntrico o medición se requiere que no realice ningún tipo de actividad física por lo menos 48 hrs antes de la respectiva sesión. También se requiere que se abstenga del alcohol o algún tipo de estimulante o depresivo (como cafeína o alcohol) al menos 12 hrs antes de las pruebas. Por último, la dieta debe mantenerse normal y se recomienda beber 2 lts de agua diarios.

Riesgos

- **Se espera que usted manifieste dolor muscular los días posteriores al ejercicio en el cicloergómetro excéntrico**
- Durante el proyecto se tomaran muestras de sangre desde el antebrazo a través de una punción con una aguja, en donde puede presentarse alguna reacción alérgica en la zona de extracción de sangre. También hay un pequeño riesgo de infección, la cual será reducida mediante el uso de materiales asépticos. Este es un procedimiento estandarizado sin reportes de reacciones adversas, el cual será realizado por un investigador acreditado para realizar el procedimiento.

Durante la prueba de consumo máximo de oxígeno ($VO_{2m\acute{a}x}$) podría manifestar sensación de mareo y fatiga, la cual en ciertas personas puede durar un par de días.

Beneficios

- Usted podrá saber cuál es su capacidad máxima aeróbica medida a través de equipos modernos.
- Usted será capaz de experimentar dos sesiones de 30 minutos en el cicloergómetro excéntrico.
- Usted será parte de una investigación que abrirá puertas y generara discusión en futuros estudios con respecto al cicloergómetro excéntrico, la cual es una herramienta muy útil para rehabilitación de distintas poblaciones clínicas y acondicionamiento deportivo.

Participación voluntaria

Su participación en este estudio es absolutamente voluntaria. No tendrá ninguna recompensa monetaria. Si usted decide no participar no necesita entregar ninguna explicación o razón de su decisión.

Preguntas y/o dudas

Si tiene cualquier pregunta o necesita información más detallada de la investigación, no dude en contactar a los investigadores a cargo del proyecto.

Consentimiento informado

Proyecto: Diferencias en el daño muscular y estrés metabólico entre los músculos extensores y flexores de rodilla inducidos por un ejercicio en cicloergómetro excéntrico

Yo, como participante de este proyecto

- He sido proveído con una copia de la Información al participante, explicando la investigación de este estudio.
- He leído y entendido la información entregada.
- He tenido la oportunidad de preguntar y aclarar todas mis dudas.
- Si tengo cualquier pregunta adicional, sé que puedo contactar a los investigadores del proyecto.
- Entiendo que al participar en este estudio deberán realizarse evaluaciones y mediciones explicadas en el documento Información al participante.
- Entiendo que la información personal entregada será de suma confidencialidad y utilizada solo para los propósitos del estudio.
- Mi participación no tendrá recompensas económicas.

Nombre: _____ Fecha: _____

Firma: _____

Testigo: _____

Contacto investigadores:

José Cangas S., estudiante kinesiología

Nicolás Guzmán W., estudiante kinesiología

Mail: jicangas@gmail.com

Mail: nguzmanw@hotmail.com

Teléfono contacto: +569 9 9492374

Teléfono contacto: +569 9 1623282

Anexo Nº 2



Cuestionario Médico Pre Evaluación

Fecha: ___/___/_____

El siguiente cuestionario a sido diseñado para la recopilación de información médica previa del paciente que pueda influenciar en el desarrollo de la investigación o si ha desarrollado alguna condición que pueda poner en peligro su salud.

Responda las siguientes preguntas en el espacio demarcado

Nombre completo: _____

Sexo: ___ Edad: ___

Lateralidad (Pierna hábil): Derecha___ Izquierda___

En caso de emergencia contactar a:

Nombre _____

Parentesco _____ Teléfono _____

Parte A

Antecedentes Mórbidos: HTA (___) Diabetes (___)

Otros: _____

Antecedentes familiares:

¿Es un fumador regular o ha dejado el cigarro en los últimos 6 meses? _____

¿Es usuario de algún remedio? Si es así, por favor escriba los nombres de estos a continuación:

1.- _____

2.- _____

3.- _____

¿Consumes algún suplemento alimenticio (ej.: proteínas, omega 3)?: Si ____ No ____

Si la respuesta anterior es si, ¿Qué producto consumes?: _____

Con que frecuencia lo consumes: _____

Parte B

Explicar las preguntas que responda afirmativamente

En el pasado, ¿ha presentado algún tipo de lesión musculoesquelética de extremidad inferior u operación? (ej. Desgarros, esguinces, fracturas)

SI NO _____

SI NO _____

¿Has tenido alguna enfermedad o lesión desde la última visita al médico?

SI NO _____

¿Has sido hospitalizado en el último tiempo? ¿Cirugía?

SI NO _____

¿Tienes alguna alergia?

¿Tienes alergias típicas de cada estación climática que requieran de tratamiento médico?

SI NO _____

- ¿Tienes asma? SI NO _____
- ¿Estuviste resfriado durante la última semana? SI NO _____
- ¿Se te ha acelerado o alterado el ritmo cardiaco? SI NO _____
- ¿Tienes presión arterial elevada o alta concentración de colesterol? SI NO _____
- ¿Te han dicho alguna vez que tienes un soplo? SI NO _____
- ¿Ha fallecido algún miembro de tu familia debido a problemas cardiacos antes de cumplir 60 años? SI NO _____
- ¿alguna vez un médico ha restringido o prohibido tu participación en deportes debido a problemas cardiacos? SI NO _____
- ¿Has tenido alguna vez una contusión cerebral? SI NO _____
- ¿Has perdido alguna vez el conocimiento? SI NO _____
- ¿Has tenido alguna vez una convulsión? SI NO _____
- ¿Tienes dolores de cabeza frecuentemente? SI NO _____

¿Has tenido alguna vez cosquilleos o pérdida de sensación en los brazos, manos, piernas o piernas?

SI NO _____

Parte C

¿Alguna vez te mareaste durante o después de ejercitar?

SI NO _____

¿Alguna vez te desmayaste durante o después de ejercitar?

SI NO _____

¿Alguna vez tuviste dolores en el pecho durante o después de ejercitar?

SI NO _____

¿Te cansas más rápido que tus amigos cuando ejercitan?

SI NO _____

¿Alguna vez te enfermaste debido a ejercicios en el calor?

SI NO _____

¿Has tenido alguna dificultad para respirar cuando hacías ejercicio?

SI NO _____

¿Toses, tienes silbidos o problemas para respirar durante o después de hacer actividades físicas?

SI NO _____

Parte D

¿Tienes algún problema de piel?
(picazón, acné, verrugas, hongos o
ampollas)

SI NO _____

¿Has tenido alguna complicación
debido a algún test de sangre?

SI NO _____

¿Tienes alguna otra condición previamente no mencionada que pueda afectar en tu salud o rendimiento durante o posterior al ejercicio a realizar durante este estudio?

SI _____ NO _____

Fecha _____

Nombre del participante

Firma del participante

Firma de los investigadores

Anexo N°3



Hoja de recopilación de datos

Fecha 1ª evaluación: ___/___/_____

Hora: _____

Fecha 2ª evaluación: ___/___/_____

Hora: _____

Nombre: _____

Edad: _____

Altura: _____

Peso: _____

IMC: _____

VO2 máx _____ POmáx _____ 60% POmáx _____

Cicloergómetro Excéntrico **Extensores ()** **Flexores ()** **Silla: _____**

Potencia Promedio 15' _____ 30' _____ (X) _____

Borg 10' _____ 20' _____ 29' _____

Frecuencia cardiaca

| | | | | | | |
|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Reposo | 5' | 10' | 15' | 20' | 25' | 30' |
| | | | | | | |

Salto vertical

SJ (N):

| | PRE | | | POST | | | Día 1 | | | Día 2 | | | Día 3 | | | Día 4 | | | Día 7 | | |
|-----|-----|--|--|------|---|---|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|
| N | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EVA | | | | / | / | / | | | | | | | | | | | | | | | |

Tiempo de vuelo (s)

| PRE | | | POST | | | Día 1 | | | Día 2 | | | Día 3 | | | Día 4 | | | Día 7 | | |
|-----|--|--|------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

CMJ (N):

| | PRE | | | POST | | | Día 1 | | | Día 2 | | | Día 3 | | | Día 4 | | | Día 7 | | |
|-----|-----|--|--|------|---|---|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|
| N | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EVA | | | | / | / | / | | | | | | | | | | | | | | | |

Tiempo de vuelo (s)

| PRE | POST | | | Día 1 | | | Día 2 | | | Día 3 | | | Día 4 | | | Día 7 | | | | | |
|-----|------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Flexibilidad

Grados (°):

AKE

| | PRE | POST | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ROM | | | | | | | |
| EVA | | / | | | | | |

SLR

| | PRE | POST | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ROM | | | | | | | |
| EVA | | / | | | | | |

THOMAS (Psoas)

| | PRE | POST | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ROM | | | | | | | |
| EVA | | / | | | | | |

THOMAS (Cuádriceps)

| | PRE | POST | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ROM | | | | | | | |
| EVA | | / | | | | | |

Sit and Reach

| | PRE | | | POST | | | Día 1 | | | Día 2 | | | Día 3 | | | Día 4 | | | Día 7 | | |
|-----|-----|--|--|------|---|---|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|--|
| Cms | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EVA | | | | / | / | / | | | | | | | | | | | | | | | |

PPT

Newton:

Vasto Lateral

| | PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| X | | | | | | |

Vasto Medial

| | PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| X | | | | | | |

Recto Anterior

| | PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| X | | | | | | |

Bíceps Femoral

| | PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| X | | | | | | |

Semitendinoso

| | PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| X | | | | | | |

Glúteo Mayor

| | PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| X | | | | | | |

Dolor

EVA

Caminar

| PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | |

Bajar escaleras

| PRE | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 7 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | |

ANEXO N°4

Evaluación _____

EVA

Participante: _____

| | |
|---|---|
| SJ _____ | THOMAS _____ |
|  |    |
| SJ _____ | THOMAS _____ |
|  |    |
| SJ _____ | SR _____ |
|  |    |
| CMJ _____ | SR _____ |
|  |    |
| CMJ _____ | SR _____ |
|  |    |
| CMJ _____ | CAMINAR _____ |
|  |    |
| AKE _____ | ESCALERA _____ |
|  |    |
| SLR _____ | |
|  |  |

ANEXO N°5

Prueba $VO_{2m\acute{a}x}$

| | Tiempo | Potencia | FC |
|--|--------|----------|----|
| | 4' | 50 W | |
| | 5' | 75 W | |
| | 6' | 100 W | |
| | 7' | 125 W | |
| | 8' | 150 W | |
| | 9' | 175 W | |
| | 10' | 200 W | |
| | 11' | 225 W | |
| | 12' | 250 W | |
| | 13' | 275 W | |
| | 14' | 300 W | |
| | 15' | 325 W | |
| | 16' | 350 W | |

| |
|---------------------|
| $VO_{2m\acute{a}x}$ |
| |

Santiago, 01 de Abril de 2014



Kinesiólogo

Claudio Villagrán, MG

Director de Escuela de Kinesiología

Avda. Pedro de Valdivia 1509

Edificio Amberes - Piso 6

Santiago

Estimado director:

José Ignacio Cangas Seiba y Nicolás Felipe Guzmán Weber, estudiantes de 5º año Kinesiología en la Universidad Finis Terrae ante Ud. y con todo respeto nos presentamos y exponemos:

Que siendo requisito indispensable para la ejecución del proyecto tesis le solicitamos la aprobación de este, para optar al título de Licenciado en Kinesiología, el cual ha sido enviado a la Escuela de Kinesiología de la Universidad Finis Terrae el día de hoy. Este documento ha sido entregado de forma digital y escrita.

Por lo expuesto, pido a Ud., Sr. Director acceder a nuestra solicitud.

José Ignacio Cangas Seiba

Nicolás Felipe Guzmán Weber