Universidad San Jorge

Facultad de Ciencias de la Salud

Grado de Fisioterapia

Proyecto Final

Título proyecto

Efectividad de un protocolo multimodal de rehabilitación de 12 semanas dirigido a reducir la inhibición muscular artrogénica del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior: protocolo de ensayo clínico aleatorizado

Autor del proyecto: Guillaume Bonnemason-Carrère

Director del proyecto: Alberto Rubio

Zaragoza, 18 de mayo de 2026

universidad SANJORGE

GRUPO SANVALERO

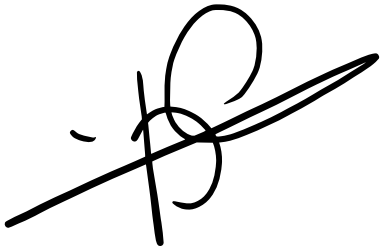
Declaración del alumno:

Este trabajo constituye parte de mi candidatura para la obtención del título de Grado en Fisioterapia de la Universidad San Jorge y no ha sido entregado previamente (o simultáneamente) para la obtención de cualquier otro título.

Este documento es el resultado de mi propio trabajo, excepto donde de otra manera esté indicado y referido.

Doy mi consentimiento para que se archive este trabajo en la biblioteca universitaria de Universidad San Jorge, donde se puede facilitar su consulta.

Firma: Guillaume Bonnemason-Carrère Fecha : 18 de mayo de 2026



Dedicatoria y agradecimientos :

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por haberme dado la oportunidad de realizar estos estudios y por haber contribuido a que pudiera llegar hasta aquí. Este trabajo representa el cierre de una etapa importante de mi formación y no habría sido posible sin su apoyo.

Quiero agradecer especialmente a Eva, mi pareja, por haber estado a mi lado desde el inicio de este camino. Gracias por tu apoyo constante, por acompañarme en los momentos difíciles y por impulsarme siempre a mantener la disciplina necesaria para seguir avanzando y dar lo mejor de mí. Tu presencia ha sido fundamental durante estos años y me ha ayudado a afrontar esta etapa con constancia, exigencia y compromiso.

También quiero expresar mi agradecimiento a todos los profesores de la Universidad San Jorge que, a lo largo de la carrera, han despertado mi curiosidad y han sabido responder a mis preguntas. Gracias por transmitirme conocimientos, por estimular mi espíritu crítico y por alimentar mis ganas de aprender cada día más para convertirme en un mejor fisioterapeuta.

Del mismo modo, quiero agradecer a todos los tutores de prácticas y profesionales que he tenido la oportunidad de conocer durante mi formación clínica. Cada uno de ellos me ha aportado una parte de su experiencia, me ha permitido ampliar mi visión de la fisioterapia y me ha ayudado a crecer tanto a nivel personal como profesional.

Quiero dedicar un agradecimiento especial al CERS de Capbreton, por haberme permitido realizar unas prácticas muy enriquecedoras y desarrollar un proyecto científico sobre la inhibición muscular artrogénica. Esta experiencia despertó en gran medida mi interés por la AMI y fue el punto de partida del tema de este Trabajo Fin de Grado.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros de clase, con quienes he compartido estos cuatro años de carrera. Gracias por los momentos vividos, por los intercambios, por el apoyo mutuo y por haber formado parte de esta etapa universitaria.

Índice

1. Introducción 8

1.1. Marco teórico 8

2. Hipótesis y objetivos 11

2.1. Objetivo principal 11

2.2. Objetivos secundarios 11

3. Metodología 13

3.1. Diseño del estudio 13

3.2. Participantes 14

3.2.1. Criterios de inclusión 15
3.2.2. Criterios de exclusión 15
3.2.3. Criterios de abandono 16
3.2.4. Criterios para los profesionales que aplicarán la intervención 16

3.3. Variables 16

3.3.1. Variable principal 16
3.3.2. Variables secundarias 17

3.4. Momentos de evaluación 19

3.5. Tamaño muestral 20

3.6. Planificación de la intervención 21

3.6.1. Estructura general de las sesiones 22
3.6.2. Autorregulación de la carga 23
3.6.3. Descripción de las fases 24
3.6.4. Criterios de progresión 25
3.6.5. Seguimiento y monitorización 25
3.6.6. Cuidados concomitantes 25
3.6.7. Consideraciones éticas y confidencialidad 26

3.7. Análisis estadístico 26

4. Discusión 28

5. Limitaciones y fortalezas 33

6. Conclusión 35

7. Bibliografía 36

8. Anexos 43

Resumen

Introducción:

La inhibición muscular artrogénica (AMI) del cuádriceps es una alteración neurofisiológica frecuente tras la reconstrucción del ligamento cruzado anterior (RLCA), caracterizada por una disminución de la capacidad de activación voluntaria muscular. Este fenómeno puede limitar la recuperación de la fuerza, alterar el control neuromuscular y dificultar la progresión funcional hacia el retorno al deporte, especialmente en deportistas de alto nivel que practican deportes de pivote.

Objetivo:

Evaluar la eficacia de un protocolo multimodal de rehabilitación de 12 semanas dirigido a reducir la AMI del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote a partir de los tres meses posteriores a la RLCA.

Metodología:

Se propone un ensayo clínico aleatorizado, controlado, prospectivo y longitudinal, de grupos paralelos, diseñado según las recomendaciones SPIRIT. Los participantes serán asignados aleatoriamente a un grupo control, basado en rehabilitación convencional post-LCA, o a un grupo experimental, basado en un protocolo multimodal específico dirigido a la AMI. La variable principal será la activación voluntaria del cuádriceps, evaluada mediante el Central Activation Ratio (CAR). Como variables secundarias se analizarán la fuerza del cuádriceps mediante dinamometría isocinética, el control neuromuscular mediante pruebas funcionales (YBT, SLS, LSD), y análisis de vídeo, y la preparación psicológica para el retorno al deporte mediante el cuestionario ACL-RSI. Las evaluaciones se realizarán al inicio, a las 6 semanas y a las 12 semanas.

Resultados esperados:

Se espera que el grupo experimental obtenga mayores mejoras en la activación voluntaria del cuádriceps, así como en la fuerza, el control neuromuscular, la calidad del movimiento y la preparación psicológica para el retorno al deporte, en comparación con el grupo control.

Conclusión:

El protocolo propuesto podría constituir una estrategia clínica útil para abordar de forma específica la AMI del cuádriceps tras RLCA. No obstante, será necesaria su validación mediante estudios clínicos posteriores que confirmen su eficacia y aplicabilidad.

Palabras clave: inhibición muscular artrogénica; reconstrucción del ligamento cruzado anterior; músculo cuádriceps; rehabilitación; retorno al deporte; ensayo clínico aleatorizado.

Abstract

Introduction:

Arthrogenic muscle inhibition (AMI) of the quadriceps is a common neurophysiological alteration after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR), characterized by a reduced capacity for voluntary muscle activation. This phenomenon may limit strength recovery, impair neuromuscular control and delay functional progression towards return to sport, particularly in high-level athletes involved in pivoting sports.

Objective:

To evaluate the effectiveness of a 12-week multimodal rehabilitation protocol aimed at reducing quadriceps AMI in high-level pivoting-sport athletes from three months after ACLR.

Methods:

A randomized, controlled, prospective, longitudinal, parallel-group clinical trial is proposed, designed according to the SPIRIT recommendations. Participants will be randomly allocated to either a control group, following conventional post-ACLR rehabilitation, or an experimental group, following a specific multimodal protocol targeting AMI. The primary outcome will be voluntary quadriceps activation, assessed using the Central Activation Ratio (CAR). Secondary outcomes will include quadriceps strength assessed by isokinetic dynamometry, neuromuscular control assessed through functional tests and video analysis, and psychological readiness to return to sport assessed using the ACL-RSI questionnaire. Assessments will be performed at baseline, at 6 weeks and at 12 weeks.

Expected results:

The experimental group is expected to show greater improvements in voluntary quadriceps activation, as well as in strength, neuromuscular control, movement quality and psychological readiness to return to sport, compared with the control group.

Conclusion:

The proposed protocol may represent a clinically useful strategy to specifically address quadriceps AMI after ACLR. However, further clinical studies will be required to confirm its effectiveness and applicability.

Keywords: arthrogenic muscle inhibition; anterior cruciate ligament reconstruction; quadriceps muscle; rehabilitation; return to sport; randomized controlled trial.

Índice de abreviaturas

Abreviatura	Significado
ACL-RSI	Anterior Cruciate Ligament Return to Sport after Injury Scale
AMI	Inhibición muscular artrogénica / Arthrogenic Muscle Inhibition
ASPETAR	Aspetar Clinical Practice Guideline
CAR	Central Activation Ratio
CERS	Centro Europeo de Rehabilitación del Deportista
EEG	Electroencefalografía
EMG	Electromiografía
EVA	Escala Visual Analógica
HSR	Heavy Slow Resistance
IBM SPSS	IBM Statistical Package for the Social Sciences
IC	Intervalo de confianza
ITT	Análisis por intención de tratar / Intention-to-treat
LCA	Ligamento cruzado anterior
MCID	Diferencia mínima clínicamente importante / Minimal Clinically Important Difference
MOON	Multicenter Orthopaedic Outcomes Network
RFD	Rate of Force Development
RGPD	Reglamento General de Protección de Datos
RIR	Repeticiones en reserva
RLCA	Reconstrucción del ligamento cruzado anterior
RM	Repetición máxima
RPE	Rating of Perceived Exertion / Escala de percepción subjetiva del esfuerzo
SANTI	Scientific ACL Network International
SNC	Sistema nervioso central
SPIRIT	Standard Protocol Items: Recommendations for Interventional Trials
T0	Evaluación basal
T1	Evaluación intermedia a las 6 semanas
T2	Evaluación final a las 12 semanas
TFG	Trabajo Fin de Grado
TMS	Estimulación magnética transcraneal / Transcranial Magnetic Stimulation
VBT	Velocity-Based Training
1RM	Una repetición máxima

1. Introducción

1.1. Marco teórico

La inhibición muscular artrogénica, conocida como Arthrogenic Muscle Inhibition (AMI), se define como una disminución de la capacidad de activación voluntaria de un músculo secundaria a una alteración articular. En el contexto de la rodilla, este fenómeno afecta especialmente al músculo cuádriceps tras una lesión del ligamento cruzado anterior (LCA) y después de su reconstrucción quirúrgica (RLCA) [1]. Por tanto, la AMI no debe interpretarse únicamente como una debilidad muscular periférica, sino como una alteración neurofisiológica compleja de la función sensorimotora, capaz de limitar la recuperación de la fuerza, el control neuromuscular y la progresión funcional del paciente [2–5].

Desde el punto de vista fisiopatológico, la AMI resulta de la interacción entre mecanismos periféricos, espinales y supraespinales. Tras una lesión articular o una intervención quirúrgica, la alteración de las aferencias procedentes de la rodilla, relacionada con la afectación de los mecanorreceptores ligamentarios, el dolor, la inflamación o el derrame articular, modifica la información sensorial transmitida al sistema nervioso central [1,6–8]. Esta modificación aferente puede favorecer un entorno inhibitorio que limita el reclutamiento voluntario del cuádriceps [6,8].

A nivel espinal, se ha descrito una disminución de la excitabilidad de las motoneuronas alfa y una alteración de los reflejos espinales tras lesiones articulares, lo que contribuye a la inhibición refleja del músculo [9]. Además, la evidencia reciente señala la participación de mecanismos centrales, incluyendo cambios en la excitabilidad corticoespinal, en la actividad de áreas motoras y somatosensoriales y en la representación cortical del miembro afectado [10–13].

Estas alteraciones explican que la AMI pueda persistir incluso cuando la capacidad contráctil del músculo parece conservada. En consecuencia, el problema no reside solamente en la masa muscular o en la fuerza máxima, sino también en la capacidad del sistema nervioso para activar el cuádriceps de forma eficaz y coordinada. Esta perspectiva es especialmente relevante tras una RLCA, ya que una activación subóptima del cuádriceps puede favorecer estrategias compensatorias, modificar la biomecánica del miembro inferior y afectar la calidad del movimiento durante tareas funcionales y deportivas [4,10,14–17]. Además, algunas revisiones señalan que los déficits de activación voluntaria y las consecuencias funcionales asociadas a la AMI pueden persistir durante meses e incluso años después de la RLCA, lo que refuerza la necesidad de identificar y tratar este fenómeno de forma específica [5,18]. En esta línea, Zunzarren et al. observaron que aproximadamente el 40 % de los pacientes presentaban un déficit persistente de activación neuromuscular a largo plazo tras la reconstrucción del LCA [19].

La AMI constituye un fenómeno frecuente tras lesiones de rodilla. En una cohorte prospectiva reciente, Kennedy et al. describieron una incidencia aproximada del 31,8 % de AMI en pacientes con lesiones agudas de rodilla [20]. En el contexto específico de la RLCA, los estudios del grupo

SANTI muestran que la AMI puede estar presente en una proporción importante de pacientes durante las primeras semanas postoperatorias, con una recuperación incompleta en una parte de ellos a pesar de la progresión clínica inicial [21,22]. Estos datos sugieren que la AMI no debe considerarse una respuesta transitoria exclusivamente limitada a la fase aguda, sino un factor potencialmente persistente que puede condicionar la evolución de la rehabilitación [4,5,18,21,22].

Desde el punto de vista clínico, la AMI se asocia con déficits de fuerza del cuádriceps, asimetrías persistentes, alteraciones del control neuromuscular y modificaciones de la biomecánica de la marcha y de las tareas dinámicas [14,15,17,23]. Estas limitaciones pueden dificultar la progresión hacia fases avanzadas de la rehabilitación y comprometer la preparación para el retorno al deporte. Esta problemática resulta especialmente relevante en deportistas de alto nivel que practican deportes de pivote o deportes colectivos con elevadas demandas de salto, desaceleración, cambios de dirección y acciones de contacto, como el fútbol, el baloncesto, el balonmano o el voleibol. En estos contextos, el control neuromuscular del miembro inferior y la capacidad de activación rápida y coordinada del cuádriceps son determinantes tanto para el rendimiento como para la seguridad del deportista.

En la práctica clínica, la toma de decisiones para el retorno deportivo se basa habitualmente en pruebas de fuerza, simetría y rendimiento funcional, como los hop tests o los índices de simetría entre miembros [24,25]. Sin embargo, estos criterios no siempre permiten identificar un déficit persistente de activación voluntaria ni alteraciones cualitativas del control motor. En este sentido, se ha propuesto que la evaluación de la AMI podría aportar información complementaria relevante para la toma de decisiones en el retorno al deporte, especialmente cuando los criterios funcionales clásicos no detectan déficits neuromusculares residuales [18,24–26].

Además, la evaluación de la AMI continúa siendo heterogénea, ya que puede realizarse mediante métodos instrumentales, como el Central Activation Ratio, la electromiografía de superficie o técnicas de estimulación superpuesta, así como mediante pruebas clínicas específicas, entre ellas la clasificación SANTI [18,22,27]. Esta variabilidad limita la comparación entre estudios y dificulta la integración sistemática de la AMI en la toma de decisiones clínicas. Por ello, resulta necesario utilizar herramientas de evaluación que permitan valorar no solo el rendimiento funcional, sino también la capacidad real de activación voluntaria del cuádriceps.

La rehabilitación tras RLCA se apoya actualmente en recomendaciones clínicas y protocolos basados en criterios, entre los que destacan las guías MOON y ASPETAR, centrados en la reducción del dolor y del derrame, la recuperación de la movilidad articular, especialmente de la extensión, el fortalecimiento progresivo del cuádriceps y el entrenamiento neuromuscular orientado a la función y al retorno deportivo [28–30]. Estas guías han permitido estructurar la progresión de la rehabilitación mediante criterios funcionales y objetivos de recuperación. No obstante, aunque estos programas incluyen componentes musculares y neuromusculares, no

siempre están diseñados para abordar de forma explícita los mecanismos específicos implicados en la AMI [2,31].

En relación con el tratamiento específico de la AMI, las estrategias descritas en la literatura suelen orientarse a disminuir la inhibición refleja, facilitar la activación voluntaria del cuádriceps y mejorar el reclutamiento neuromuscular. Entre las intervenciones más utilizadas se encuentran la crioterapia y la estimulación eléctrica neuromuscular, que buscan reducir el entorno inhibitorio y facilitar la contracción del cuádriceps; el biofeedback electromiográfico, dirigido a mejorar la percepción y el control de la activación muscular; y los programas de fortalecimiento progresivo, incluyendo el trabajo excéntrico, con el objetivo de recuperar la capacidad de producción de fuerza y el control del movimiento [6,30,32–34]. Además, se han propuesto estrategias dirigidas al sistema nervioso central, como la imaginería motora o la estimulación transcraneal, con el fin de modular la excitabilidad corticoespinal y favorecer la recuperación del control motor [35,36].

El ejercicio excéntrico resulta especialmente interesante por sus elevadas demandas mecánicas y sus adaptaciones neuromusculares específicas, incluyendo diferencias en el control neural respecto a las contracciones concéntricas [37,38]. Asimismo, las estrategias basadas en la intención motora, la imaginería motora y el feedback podrían contribuir a mejorar la calidad del reclutamiento voluntario y la integración sensorimotora del miembro afectado [13,35,36]. Sin embargo, la literatura sugiere que muchas de estas intervenciones han sido estudiadas de forma aislada, con una gran heterogeneidad metodológica y sin integrarse necesariamente en protocolos estructurados dirigidos de manera específica a reducir la AMI [2,31,34].

Además, la evidencia reciente sobre neuroplasticidad después de lesión del LCA refuerza la necesidad de considerar la rehabilitación desde una perspectiva más amplia que el fortalecimiento muscular tradicional [10,12,13,39]. Las alteraciones de la excitabilidad corticoespinal, de la representación cortical y del control sensorimotor justifican la incorporación de estrategias que estimulen no solo la fuerza, sino también la calidad del reclutamiento, la intención motora, la propiocepción, el control del movimiento y la exposición progresiva a tareas funcionales complejas [13,14]. No obstante, el interés principal no reside en aplicar técnicas aisladas de neuromodulación, sino en integrar estrategias activas y clínicamente transferibles que puedan estimular simultáneamente la activación voluntaria, la intención motora y el control sensorimotor del cuádriceps.

A pesar de los avances en la rehabilitación tras RLCA, sigue existiendo una falta de protocolos estructurados que integren de forma coherente estas dimensiones y que evalúen específicamente la evolución de la activación voluntaria del cuádriceps. Esta limitación puede contribuir a que algunos pacientes presenten una recuperación funcional aparente sin una resolución completa del déficit de activación. En deportistas de alto nivel que practican deportes de pivote o deportes colectivos, esta situación resulta especialmente relevante, ya que la persistencia de

compensaciones neuromusculares podría limitar la recuperación del nivel deportivo previo, alterar la confianza en la rodilla y aumentar potencialmente el riesgo de nuevas lesiones.

La rehabilitación convencional tras RLCA se plantea como comparador porque constituye la práctica clínica habitual y permite valorar si una intervención multimodal específicamente orientada a la AMI aporta beneficios adicionales sobre la atención estándar.

Por ello, resulta pertinente desarrollar un protocolo de rehabilitación multimodal de 12 semanas orientado específicamente a reducir la AMI del cuádriceps en deportistas de alto nivel pertenecientes a deportes de pivote tras RLCA, especialmente en deportes colectivos con altas demandas de salto, desaceleración, cambios de dirección y contacto, integrando estrategias activas y clínicamente transferibles que actúen sobre los componentes musculares, neuromusculares y centrales implicados en este fenómeno.

2. Hipótesis y objetivos

Hipótesis nula

La aplicación de un protocolo multimodal de 12 semanas en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras RLCA no producirá mejoras significativas en la activación voluntaria del cuádriceps ni en las variables de fuerza, funcionales y neuromusculares, en comparación con una rehabilitación convencional tras RLCA.

Hipótesis alternativa

La aplicación de un protocolo multimodal de 12 semanas en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras RLCA producirá mayores mejoras en la activación voluntaria del cuádriceps, así como en las variables de fuerza, funcionales y neuromusculares, en comparación con una rehabilitación convencional tras RLCA.

2.1. Objetivo principal

Evaluar la efectividad de una intervención multimodal de rehabilitación de 12 semanas, en comparación con una rehabilitación convencional, para reducir la AMI del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras RLCA, mediante la mejora de la activación voluntaria del cuádriceps evaluada con el Central Activation Ratio (CAR) en los momentos T0, T1 y T2, en el contexto de un protocolo de ensayo clínico aleatorizado.

2.2. Objetivos secundarios

Fuerza

Evaluar la evolución de la fuerza del cuádriceps mediante isocinética con BIODEX tras 12 semanas de intervención y comparar los cambios entre el grupo experimental y el grupo control.

Control neuromuscular

Evaluar las modificaciones del control neuromuscular y de la calidad del movimiento del miembro inferior mediante el Y-Balance Test, el Lateral Step-Down Test y el Single-Leg Squat, complementados con análisis de vídeo mediante Kinovea, en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras RLCA, comparando su evolución entre T0, T1 y T2 en el grupo experimental y el grupo control.

Dimensión psicológica

Evaluar la evolución de la confianza del paciente ante la reincorporación a la actividad deportiva mediante el cuestionario validado Anterior Cruciate Ligament Return to Sport after Injury Scale (ACL-RSI), tras 12 semanas de intervención, y comparar los cambios entre el grupo experimental y el grupo control.

3. Metodología

3.1. Diseño del estudio

Se plantea un protocolo de ensayo clínico aleatorizado, controlado, prospectivo y longitudinal, de grupos paralelos, diseñado según las recomendaciones de la guía SPIRIT. Se trata de un estudio monocéntrico que se llevará a cabo en un centro especializado en rehabilitación deportiva de alto nivel de deportes de pivote, en el Centro Europeo de Rehabilitación del Deportista (CERS), ubicado en Francia.

El objetivo será evaluar la eficacia de un protocolo multimodal específico para reducir la inhibición muscular artrogénica (AMI) del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior (RLCA), en comparación con un programa de rehabilitación convencional post-LCA. El diseño general del estudio se presenta en la Figura 1.

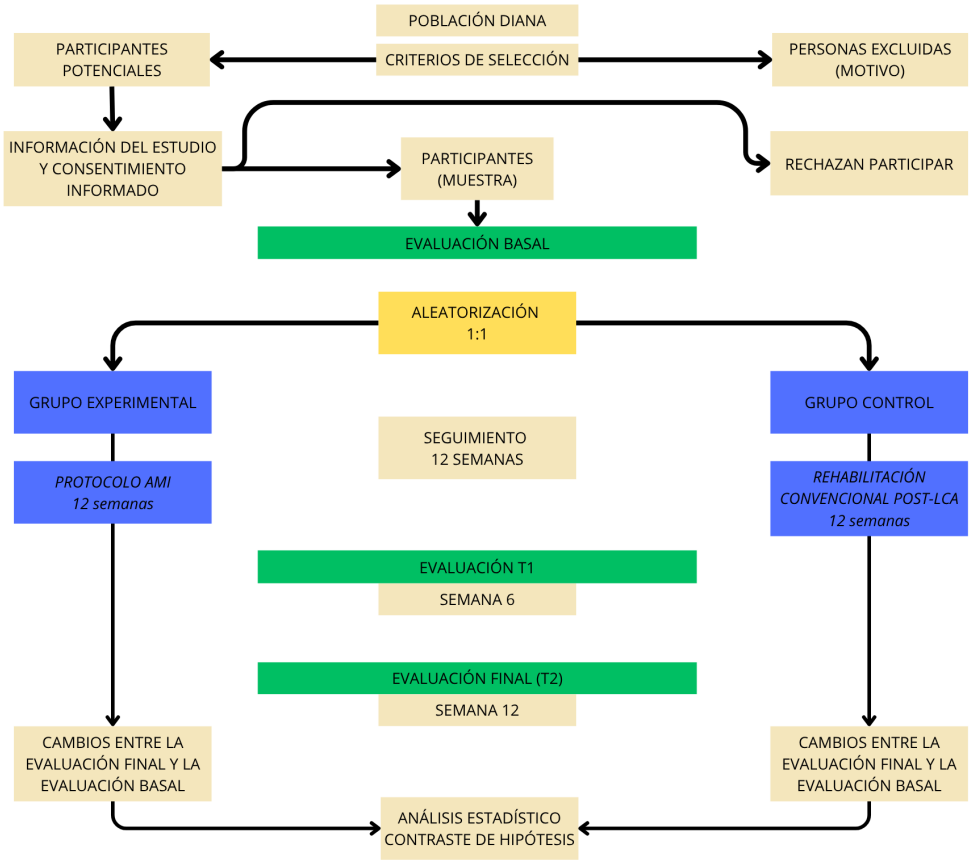


Figura 1 : Diagrama de flujo del diseño del estudio

Tras la evaluación basal, la confirmación de la presencia de AMI y la verificación de los criterios de elegibilidad, los participantes serán asignados aleatoriamente en una proporción 1:1 al grupo

experimental o al grupo control mediante randomización simple. La secuencia de aleatorización será generada mediante software informático por un investigador independiente, ajeno al reclutamiento, a la intervención y a la evaluación de los resultados. La ocultación de la asignación se garantizará mediante sobres opacos, sellados y numerados secuencialmente, que solo serán abiertos una vez completada la evaluación basal.

La duración total del protocolo será de 12 semanas, iniciándose entre los 3 y 6 meses posteriores a la RLCA. Las evaluaciones se realizarán en tres momentos : evaluación basal (T0), evaluación intermedia a las 6 semanas (T1) y evaluación final a las 12 semanas (T2).

Debido a la naturaleza de la intervención fisioterapéutica, no será posible cegar a los fisioterapeutas responsables de aplicar los protocolos, ya que deberán conocer el contenido específico de cada intervención. No obstante, los participantes no serán informados sobre la hipótesis principal del estudio ni sobre la finalidad específica de cada grupo, con el objetivo de reducir el sesgo de expectativa.

La persona encargada de realizar las evaluaciones y recoger los datos permanecerá cegada respecto a la asignación de los participantes. Asimismo, en la medida de lo posible, el análisis estadístico se realizará por un investigador externo cegado a la asignación de los grupos.

Con el objetivo de mejorar la transparencia, la reproducibilidad y minimizar el riesgo de sesgos, se propone el registro previo del protocolo en una base de datos internacional de ensayos clínicos, como ClinicalTrials.gov.

3.2. Participantes

Los participantes serán reclutados de forma consecutiva en un centro especializado en rehabilitación deportiva que atienda a deportistas tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA). La población de estudio estará compuesta por deportistas de alto nivel de deportes de pivote, definidos como aquellos incluidos en programas de rendimiento o con exigencias competitivas elevadas, en fase de rehabilitación tras reconstrucción unilateral del LCA [2,40].

El reclutamiento será voluntario entre los pacientes que cumplan los criterios de elegibilidad establecidos. Todos los participantes recibirán información detallada sobre el estudio y deberán firmar un consentimiento informado previo a su inclusión.

La presencia de AMI será determinada mediante el Central Activation Ratio (CAR), calculado a partir de la técnica de estimulación superpuesta (superimposed burst technique), herramienta utilizada para cuantificar los déficits de activación voluntaria tras lesiones de rodilla [5].

Un CAR inferior a 0,95, valor habitualmente considerado como referencia de activación voluntaria normal en sujetos sanos, se interpretará como indicativo de déficit de activación voluntaria y de presencia de AMI [17].

3.2.1. Criterios de inclusión

Se incluirán en el estudio aquellos participantes que cumplan los siguientes criterios:

- Edad entre 18 y 35 años.
- Deportistas de alto nivel practicantes de deportes de pivote, como fútbol, balonmano, baloncesto, voleibol o rugby, en proceso de retorno a la actividad deportiva [40].
- Reconstrucción unilateral del LCA sin restricción en el tipo de plastia utilizada.
- Tiempo postoperatorio comprendido entre 3 y 6 meses tras la reconstrucción del LCA, fase en la que suelen iniciarse etapas más avanzadas de rehabilitación orientadas a la fuerza y al control neuromuscular [28,29], con capacidad funcional compatible con ejercicio terapéutico supervisado.
- Presencia de AMI, evaluada mediante el Central Activation Ratio (CAR)
- Firma del consentimiento informado
- Se permitirá la inclusión de participantes con lesiones asociadas como lesiones meniscales o ligamentarias, siempre que no comprometan la capacidad funcional ni interfieran con la ejecución del protocolo, dado que estas lesiones son asociadas a la lesión del LCA de manera frecuente [41].

3.2.2. Criterios de exclusión

Se excluirán del estudio aquellos participantes que presenten:

- Re-rotura del LCA
- Lesiones asociadas graves que comprometan la función del miembro inferior
- Patología neurológica que afecte al control motor
- Dolor intenso no controlado que limite la ejecución segura de los ejercicios
- Incapacidad para participar en un programa de rehabilitación
- Participación simultánea en otro protocolo de investigación que pueda interferir con los resultados.

3.2.3. Criterios de abandono

Los participantes podrán ser retirados del estudio en los siguientes casos:

- Decisión voluntaria del participante.
- Incumplimiento significativo del protocolo.
- Efectos adversos que contraindiquen la continuación.
- Pérdida de seguimiento durante el estudio.
- Asistencia inferior al 80% de las sesiones programadas
- Dolor persistente superior a 5/10 en la escala EVA relacionado con la intervención.

3.2.4. Criterios para los profesionales que aplicarán la intervención

Las intervenciones serán realizadas por fisioterapeutas con experiencia en rehabilitación deportiva y en el manejo de pacientes tras reconstrucción del LCA.
Para garantizar la homogeneidad, los fisioterapeutas recibirán formación previa y seguirán un protocolo de intervención estandarizado.

3.3. Variables

3.3.1. Variable principal

La variable principal del estudio será la activación voluntaria del cuádriceps, evaluada mediante el Central Activation Ratio (CAR), calculado a partir de la técnica de *interpolated twitch utilizando la superimposed burst technique [42,43].*

El CAR permite cuantificar de forma objetiva la capacidad del sistema nervioso para activar el músculo durante una contracción voluntaria máxima. Para su evaluación, el participante realizará una contracción voluntaria máxima isométrica de extensión de rodilla, habitualmente en un dinamómetro isocinético, mientras se aplica un estímulo eléctrico supramáximo sobre el cuádriceps durante la fase de máxima contracción. La respuesta adicional generada por la estimulación permite estimar la parte de activación muscular que no ha sido alcanzada voluntariamente por el participante. Valores inferiores a los considerados normales en sujetos sanos (≈ 0,95) serán interpretados como un déficit de activación voluntaria, indicativo de la presencia de AMI [44,45].

La activación voluntaria del cuádriceps es un elemento clave tras la reconstrucción del LCA, ya que la AMI limita la capacidad de generar fuerza y afecta el control neuromuscular [46]. El procedimiento detallado de evaluación del CAR se presenta en el Anexo 3.

El análisis de esta variable se realizará mediante el cambio desde la evaluación basal (T0) hasta las evaluaciones posteriores (T1 y T2), comparando tanto las diferencias intragrupo como intergrupo.

3.3.2. Variables secundarias

Las variables secundarias del estudio serán la fuerza del cuádriceps, el control neuromuscular y funcional del miembro inferior, y la preparación psicológica para el retorno al deporte. La descripción detallada de los procedimientos de evaluación se presenta en los Anexos 4, 5 y 6.

Fuerza muscular

La fuerza del cuádriceps será evaluada mediante un dinamómetro isocinético (Biodex), que permitirá analizar la producción de fuerza en condiciones isométricas, concéntricas y excéntricas. Se trata de una herramienta fiable y reproducible para la evaluación de la fuerza muscular [47,48].

La variable principal de fuerza será el peak torque concéntrico del cuádriceps a 60°/s, normalizado al peso corporal. De forma complementaria, se registrarán la potencia a 240°/s y la fuerza excéntrica a 30°/s, con el fin de obtener una valoración más completa del rendimiento muscular del cuádriceps.

Durante la prueba, el participante se colocará sentado en el dinamómetro, con el tronco, la pelvis y el muslo estabilizados mediante cinchas. El eje del dinamómetro se alineará con el eje articular de la rodilla y el participante realizará contracciones máximas de extensión y flexión de rodilla siguiendo instrucciones estandarizadas.

El uso del Biodex permite estandarizar la posición del participante, el ángulo articular, la velocidad angular y el modo de contracción, lo que mejora la reproducibilidad de las mediciones. Esta estandarización resulta especialmente relevante en el contexto de la AMI, ya que permite evaluar la producción de fuerza del cuádriceps en condiciones controladas durante los diferentes momentos de evaluación.

La fuerza muscular del cuádriceps es un determinante fundamental del rendimiento funcional y del retorno al deporte tras reconstrucción del LCA, y se asocia con la capacidad de cumplir criterios funcionales de retorno deportivo [49,50].

Además, la contracción isométrica máxima será utilizada en el contexto de la evaluación del CAR. El procedimiento detallado de evaluación de la fuerza mediante Biodex se presenta en el Anexo 4.

Control neuromuscular y funcional

El control neuromuscular y funcional será evaluado mediante el Y-Balance Test, el Lateral Step-Down Test y el Single-Leg Squat, con el objetivo de valorar el control postural dinámico, la estabilidad de la rodilla y la calidad del movimiento.

El Y-Balance Test evaluará la estabilidad dinámica del miembro inferior mediante alcances en tres direcciones: anterior, posteromedial y posterolateral. Se registrará la distancia alcanzada en cada dirección, normalizada respecto a la longitud del miembro inferior, así como la puntuación compuesta y la asimetría entre miembros, prestando especial atención a déficits superiores a 4 cm en la dirección anterior como posible indicador clínico de alteración del control dinámico [51]. Esta prueba ha mostrado relación con el rendimiento funcional y el control dinámico en pacientes tras reconstrucción del LCA [52,53].

El Lateral Step-Down Test permitirá valorar el control del miembro inferior durante una tarea funcional de descenso unipodal desde un step. Se observarán la alineación de la rodilla, el control del valgo dinámico, la estabilidad pélvica, el control del tronco y la calidad global del movimiento.

El Single-Leg Squat permitirá evaluar la calidad del movimiento durante una sentadilla unipodal, prestando especial atención al valgo dinámico de rodilla, la estabilidad del pie, el control pélvico y las compensaciones del tronco. Esta prueba constituye una herramienta válida y fiable para analizar la calidad del movimiento y detectar alteraciones del control motor [54–56].

Para el Lateral Step-Down Test y el Single-Leg Squat se utilizará una valoración cualitativa basada en criterios clínicos previamente descritos: alineación de la rodilla, valgo dinámico, control pélvico, inclinación del tronco, estabilidad del pie y pérdida de equilibrio. Cuando se utilice una escala ordinal, una puntuación más alta indicará peor calidad del movimiento. El análisis mediante Kinovea permitirá comparar de forma estandarizada la alineación del miembro inferior entre T0, T1 y T2.

Estas medidas permitirán analizar la transferencia funcional de las mejoras neuromusculares hacia tareas relacionadas con el retorno al deporte [57–59]. El procedimiento detallado de las pruebas funcionales y del análisis de vídeo se presenta en el Anexo 5.

Variable psicológica

La preparación psicológica para el retorno al deporte será evaluada mediante el cuestionario ACL-RSI (Anterior Cruciate Ligament – Return to Sport after Injury), que valora la confianza del deportista, las emociones asociadas al retorno y el miedo a sufrir una nueva lesión.

El ACL-RSI es un instrumento validado para evaluar los factores psicológicos relacionados con el retorno al deporte tras lesión del LCA [60,61]. Su puntuación se expresa habitualmente en una escala de 0 a 100, donde valores más elevados indican una mayor preparación psicológica para volver a la actividad deportiva.

La confianza y el miedo a la recidiva pueden influir en el retorno al deporte y en la recuperación funcional tras reconstrucción del LCA [62,63]. El cuestionario ACL-RSI completo se presenta en el Anexo 6.

3.4. Momentos de evaluación

Las variables del estudio serán evaluadas en tres momentos: evaluación basal (T0), evaluación intermedia a las 6 semanas de intervención (T1) y evaluación final a las 12 semanas, al término del protocolo (T2).

Este seguimiento permitirá analizar la evolución temporal de las variables y comparar los cambios entre el grupo experimental y el grupo control.

Fase / Variable	Reclutamiento	T0 (Evaluación inicial)	Intervención	T1 (6 sem)	T2 (12 sem)
Inclusión / Exclusión	✓				
Consentimiento informado	✓				
Randomización		✓			
CAR (Activación voluntaria)		✓		✓	✓
Fuerza muscular		✓		✓	✓
Control neuromuscular (Tests funcionales)		✓		✓	✓
ACL-RSI (variable psicológica)		✓		✓	✓
Aplicación intervención			✓	✓	✓
Seguimiento / Adherencia			✓	✓	✓

Tabla 1 : Cronograma de evaluación de las variables del estudio

Fase / tarea	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
Recabar información	✓									
Aprobación comité de ética		✓								
Preparación material		✓								
Reclutamiento			✓	✓	✓					
Evaluación inicial					✓					
Intervención					✓	✓	✓			
Evaluación intermedia						✓				
Evaluación final							✓			
Seguimiento					✓	✓	✓			
Evaluación seguimiento							✓			
Análisis estadístico								✓		
Redacción proyecto								✓	✓	
Difusión datos										✓

Tabla 2 : Cronograma general del estudio

En una primera fase, se verificará el cumplimiento de los criterios de elegibilidad y se obtendrá el consentimiento informado.

Posteriormente, se realizará la evaluación basal (T0), que incluirá la medición de todas las variables del estudio, y después los participantes serán asignados aleatoriamente a los grupos de intervención.

La intervención tendrá una duración total de 12 semanas, durante las cuales los participantes seguirán el programa correspondiente a su grupo.

3.5. Tamaño muestral

El cálculo del tamaño muestral se realizará a partir de la variable principal del estudio, la activación voluntaria del cuádriceps evaluada mediante el Central Activation Ratio (CAR).

Para dicho cálculo se considerará un nivel de significación de α = 0,05, una potencia estadística del 80 %, una asignación 1:1 entre grupo control y grupo experimental, y un porcentaje estimado de pérdidas del 10% teniendo en cuenta las características de la población.

Actualmente no se dispone de valores suficientemente específicos sobre la diferencia mínima clínicamente relevante (MCID) ni sobre la desviación estándar del CAR en deportistas con AMI tras reconstrucción del LCA. Por este motivo, no es posible determinar con precisión el tamaño muestral definitivo únicamente a partir de la literatura disponible.

Por ello, se propone la realización previa de un estudio piloto, con el objetivo de estimar la variabilidad del CAR en esta población, el efecto esperado de la intervención, la viabilidad del protocolo y el porcentaje de pérdidas. Estos datos permitirán realizar posteriormente un cálculo muestral definitivo para un ensayo clínico aleatorizado.

3.6. Planificación de la intervención

El protocolo de intervención tendrá una duración total de 12 semanas y será aplicado mediante tres sesiones principales supervisadas por semana, de aproximadamente 60 minutos, complementadas por una sesión semanal de baja carga orientada a la activación, la familiarización y la monitorización.

El grupo experimental seguirá un protocolo multimodal específico dirigido a la reducción de la AMI, mientras que el grupo control realizará una rehabilitación convencional post-RLCA basada en recomendaciones actuales [28–30,64,65].

El grupo control seguirá un programa centrado en la recuperación funcional del miembro inferior, incluyendo fortalecimiento progresivo del cuádriceps, trabajo neuromuscular y progresión hacia el retorno al deporte, sin incorporar de forma sistemática estrategias específicas de activación voluntaria, imaginería motora o autorregulación avanzada de la carga.

El programa estará estructurado en tres fases progresivas, aunque la progresión no se basará exclusivamente en el tiempo, sino en el cumplimiento de criterios clínicos y funcionales previamente definidos. Se establecerán puntos de reevaluación en las semanas 4 y 8 para determinar el paso a la siguiente fase. En caso de no cumplirse dichos criterios, el participante continuará en la misma fase, ajustando la intensidad y la complejidad de los ejercicios.

Tipo de evaluación / Tiempo	T0	Semana 4	T1	Semana 8	T2
Check-point de los criterios de progresión		✓		✓	
Evaluaciones de las variables del estudio	✓		✓		✓

Tabla 3 : Puntos de reevaluación de los criterios de progresión

Este enfoque permitirá individualizar la progresión del tratamiento, evitando tanto una progresión prematura como un retraso innecesario en la carga, y favoreciendo la recuperación progresiva de la activación voluntaria del cuádriceps.

3.6.1. Estructura general de las sesiones

Cada sesión seguirá una estructura estandarizada orientada a optimizar la activación neuromuscular y la calidad del movimiento:

1. Activación neuromuscular inicial

Ejercicios de extensión activa de rodilla con banda elástica, contracciones concéntricas del cuádriceps y tareas de activación selectiva orientadas a facilitar la activación voluntaria del cuádriceps y preparar el sistema neuromuscular [2,31].

Durante esta fase inicial podrá utilizarse biofeedback visual o verbal con el objetivo de mejorar la percepción de la contracción muscular, reforzar la conexión entre intención motora y ejecución, y favorecer la activación voluntaria del cuádriceps en presencia de AMI.

2. Trabajo de imaginería motora

Ejercicios de visualización de la contracción voluntaria del cuádriceps, la extensión activa de rodilla y los gestos funcionales principales de la sesión, como el squat belt, el leg extension, las zancadas, con el objetivo de favorecer la activación de las vías corticospinales y mejorar la preparación motora previa a la ejecución [10,36,66–69].

3. Fortalecimiento principal (HSR / excéntrico)

Ejercicios de alta tensión muscular, principalmente squat belt, split squat, leg extension, leg curl y variantes unilaterales, realizados de forma lenta y controlada, priorizando la calidad de la contracción, la activación voluntaria y el control motor sobre el volumen de trabajo [6,29,37,70–75].

4. Trabajo neuromuscular y funcional

Ejercicios orientados al control motor del miembro inferior, incluyendo single-leg squat, lateral step-down, Y-Balance drill, perturbaciones ligeras, desaceleraciones, aterrizajes controlados y cambios de dirección progresivos [29,76–79]

5. Educación y feedback final

Registro del dolor mediante EVA, percepción subjetiva del esfuerzo mediante RPE, repeticiones en reserva, fatiga, calidad técnica y respuesta articular, junto con feedback verbal orientado a reforzar la conciencia corporal, la percepción del cuádriceps y la calidad de ejecución durante la sesión [79].

3.6.2. Autorregulación de la carga

La intensidad del entrenamiento será autorregulada mediante el uso del RIR (repeticiones en reserva), priorizándolo frente a los porcentajes de 1RM, ya que en pacientes con AMI la capacidad de generar fuerza máxima puede estar alterada, lo que limita la validez de la estimación de la carga relativa [2,80–84].

El objetivo será mantener una intensidad suficiente para estimular adaptaciones neuromusculares, aproximando el esfuerzo al fallo muscular sin necesidad de alcanzarlo, evitando una fatiga excesiva y una pérdida de calidad técnica [85–87]

La disminución de la velocidad de ejecución durante las últimas repeticiones será utilizada como indicador indirecto de fatiga neuromuscular, permitiendo ajustar o detener la serie cuando la calidad del movimiento se deteriore [64,88–90].

Este enfoque permitirá priorizar la activación voluntaria, el control motor y la calidad de ejecución durante todo el protocolo.

3.6.3. Descripción de las fases

El protocolo experimental se organizará en tres fases progresivas de cuatro semanas, orientadas a la reactivación inicial, el fortalecimiento neuromuscular y la transferencia funcional hacia el retorno al deporte. La descripción general de cada fase se presenta en la Tabla 4. El contenido detallado de las sesiones, incluyendo ejercicios, series, repeticiones, tempo, descansos, intensidad, criterios de progresión y sesión complementaria, se presenta en el Anexo 7.

Fase	Semanas	Objetivo principal	Contenido principal
Fase 1 Reactivación y control motor inicial	1-4	Restaurar la activación voluntaria del cuádriceps, mejorar la conciencia corporal y establecer patrones motores de calidad.	- Educación y conciencia del cuádriceps - Imaginería motora - Activación neuromuscular selectiva - Fortalecimiento excéntrico/HSR de baja-moderada carga - Control motor en tareas simples.
Fase 2 Fortalecimiento y control neuromuscular	5-8	Incrementar la producción de fuerza del cuádriceps y mejorar el control neuromuscular en tareas funcionales.	- Fortalecimiento excéntrico/HSR progresivo con tempo lento - Aumento progresivo de la carga - Tareas unipodales - Introducción de perturbaciones, variabilidad y progresión hacia tareas dinámicas.
Fase 3 Alta carga y transferencia funcional	9-12	Maximizar la producción de fuerza en condiciones controladas y favorecer la transferencia hacia tareas específicas del retorno al deporte.	- Fortalecimiento excéntrico de alta carga con tempo controlado. - Ejecución lenta y controlada para minimizar la contribución del ciclo estiramiento-acortamiento. - control neuromuscular avanzado. - Trabajo de desaceleración, aterrizaje y cambio de dirección - Progresión hacia tareas deportivas específicas e introducción controlada de la producción rápida de fuerza (RFD) en contextos controlados.

Tabla 4 : Descripción de las fases de la intervención

3.6.4. Criterios de progresión

La progresión entre fases estará orientada por criterios clínicos y funcionales:

- Ejecución técnica adecuada sin compensaciones
- Control unipodal estable en tareas funcionales
- Dolor ≤ 3–4 en escala EVA
- Ausencia de derrame articular significativo
- Tolerancia adecuada a las cargas de entrenamiento
- Capacidad de mantener la velocidad de ejecución sin deterioro significativo

Desde una perspectiva de autorregulación, cuando el participante sea capaz de realizar las series manteniendo un RIR superior a 3 de forma consistente, se incrementará progresivamente la carga de trabajo [82,84,87,91].

3.6.5. Seguimiento y monitorización

Se realizará un seguimiento continuo durante las sesiones para ajustar la carga, la intensidad y la complejidad de los ejercicios según la respuesta del participante.

A partir de la segunda fase, se incluirá una sesión semanal de baja carga con exposición submáxima al dinamómetro isocinético (Biodex), para familiarizar al participante con el dispositivo y monitorizar la evolución funcional sin generar fatiga excesiva.

La electromiografía de superficie podrá utilizarse de forma complementaria para analizar patrones de activación muscular, sin constituir una variable principal del estudio.

Durante las sesiones, se registrará la percepción subjetiva del esfuerzo mediante la escala RPE, en relación con el RIR, para monitorizar la respuesta individual y ajustar la carga de trabajo [83]. Estas mediciones no serán consideradas variables principales del estudio, sino herramientas de seguimiento clínico y autorregulación.

3.6.6. Cuidados concomitantes

Durante el estudio se permitirá la atención médica habitual, así como el uso de analgesia prescrita si fuese necesario. No se permitirá la participación simultánea en otros programas de rehabilitación específicos del miembro inferior que puedan interferir con los efectos de la intervención. Cualquier tratamiento concomitante será registrado.

3.6.7. Consideraciones éticas y confidencialidad

El estudio será sometido a la aprobación de un comité de ética de investigación antes de su inicio. Todos los participantes recibirán información oral y escrita sobre los objetivos, procedimientos, beneficios y posibles riesgos del estudio, y deberán firmar un consentimiento informado antes de su inclusión.

Los datos personales serán tratados conforme a la normativa vigente de protección de datos y al Reglamento General de Protección de Datos (RGPD). La participación será voluntaria y los participantes podrán retirarse del estudio en cualquier momento sin que ello afecte a su atención sanitaria.

Cualquier modificación relevante del protocolo será comunicada al comité de ética, al registro del ensayo y, si procede, a los participantes. Los resultados del estudio podrán ser difundidos mediante comunicaciones científicas, publicaciones académicas o presentación del Trabajo Fin de Grado, preservando siempre la confidencialidad de los participantes.

3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevará a cabo con IBM SPSS Statistics versión 32.0 por investigadores externos independientes, cegados a la asignación de los grupos, con el fin de reducir el riesgo de sesgo.

En primer lugar, se realizará un análisis descriptivo de todas las variables, expresando los resultados como media ± desviación estándar en el caso de variables con distribución normal, o como mediana y rango intercuartílico en caso contrario.

La normalidad de las variables será evaluada mediante la prueba de Shapiro-Wilk, considerando el tamaño muestral esperado.

Para el análisis principal, se utilizará un modelo lineal mixto (Linear Mixed Model), considerando como factores el grupo (control vs experimental), el tiempo (T0, T1, T2) y la interacción grupo × tiempo. Este modelo permite analizar la evolución de las variables a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta la naturaleza de medidas repetidas y la posible presencia de datos faltantes. El mismo enfoque se aplicará a las variables secundarias.

En caso de observarse efectos significativos, se realizarán comparaciones post hoc con corrección por múltiples comparaciones.

El nivel de significación estadística se establecerá en $p < 0,05$, con un intervalo de confianza del 95 %.

El análisis se realizará por intención de tratar (intention-to-treat), incluyendo a todos los participantes según el grupo al que fueron asignados inicialmente.

4. Discusión

El objetivo principal del presente protocolo es analizar si una intervención multimodal, específicamente dirigida a reducir la inhibición muscular artrogénica del cuádriceps, puede producir mayores mejoras en la activación voluntaria, evaluada mediante el Central Activation Ratio, en comparación con una rehabilitación convencional tras la reconstrucción del LCA.
En el presente protocolo se espera que el grupo experimental, basado en una intervención multimodal dirigida específicamente a la inhibición muscular artrogénica, obtenga mayores mejoras en la activación voluntaria del cuádriceps, evaluada mediante el Central Activation Ratio, en comparación con el grupo control. De forma secundaria, también sería esperable observar una mejora superior en la fuerza del cuádriceps, el control neuromuscular, la calidad del movimiento y la preparación psicológica para el retorno al deporte. Estos resultados esperados responderían a la hipótesis de que una intervención centrada en los mecanismos específicos de la AMI podría aportar beneficios adicionales como complemento a la rehabilitación convencional tras reconstrucción del LCA [2,5,29].

La variable principal del estudio será la activación voluntaria del cuádriceps, evaluada mediante el CAR. Esta variable resulta clínicamente relevante porque la AMI no debe interpretarse únicamente como una pérdida de fuerza, sino como una alteración neurofisiológica que limita la capacidad del sistema nervioso para activar completamente el cuádriceps durante una contracción voluntaria máxima [1,8]. En sujetos sanos, se ha propuesto un valor de CAR cercano a 0,95 como referencia de activación voluntaria completa, por lo que valores inferiores al 95 % pueden considerarse compatibles con un déficit de activación voluntaria [44]. Sin embargo, en una revisión sistemática sobre lesiones de rodilla, Hart et al. describieron valores medios de activación del cuádriceps de aproximadamente 87,3 % en rodillas con lesión del LCA y 89,2 % tras reconstrucción del LCA, frente a valores cercanos a 98,5 % en controles sanos [5]. Además, Zunzarren et al. observaron un déficit de activación neuromuscular de aproximadamente 42 % a más de tres años de seguimiento tras reconstrucción del LCA, con un BAS-K medio de 21,8/50 en la rodilla operada frente a 37,9/50 en la contralateral [19]. Por tanto, si el grupo experimental mostrara una mayor mejora del CAR, este resultado podría interpretarse como una mejora de la capacidad de reclutamiento voluntario del cuádriceps, y no únicamente como un aumento del rendimiento muscular.

Las guías actuales de rehabilitación tras reconstrucción del LCA, como MOON y ASPETAR, constituyen una base sólida para orientar la progresión clínica, la recuperación de la fuerza, la función y el retorno al deporte [28,29]. Sin embargo, estas recomendaciones no plantean la AMI como variable principal de seguimiento ni estructuran la intervención alrededor de la recuperación específica de la activación voluntaria del cuádriceps. Esta limitación es relevante, ya que algunos

criterios actuales de retorno al deporte se apoyan principalmente en la simetría de fuerza, pruebas funcionales, hop tests y variables psicológicas, con valores habitualmente cercanos al 90 % de simetría para la fuerza y superiores al 90–95 % para pruebas funcionales según los criterios utilizados [18,24,25,29]. No obstante, un deportista puede alcanzar determinados criterios funcionales y mantener todavía déficits de activación neuromuscular [18,19,46]. En este contexto, el presente protocolo no pretende sustituir la rehabilitación convencional, sino complementarla mediante una intervención multimodal que integra activación voluntaria, fuerza, imaginería motora, feedback, control neuromuscular y autorregulación de la carga [2,34,36].

En relación con la fuerza del cuádriceps, evaluada mediante dinamometría isocinética, sería esperable que el grupo experimental presentara mejoras superiores respecto al grupo control. El Biodex permite una valoración precisa del torque, controlando la velocidad angular y el rango de movimiento, lo que facilita identificar déficits de fuerza en diferentes condiciones de evaluación [47,48,50,92]. En la literatura sobre retorno al deporte tras reconstrucción del LCA, se utilizan habitualmente criterios de simetría de fuerza cercanos al 90 % entre miembros, especialmente para el torque máximo del cuádriceps evaluado mediante dinamometría isocinética [24,29]. Además, la evaluación a velocidades bajas, como 60°/s, permite analizar principalmente la fuerza máxima, mientras que velocidades más altas, como 180°/s o 240°/s, pueden aportar información complementaria sobre la producción de fuerza en condiciones más dinámicas [50,92]. En el presente protocolo, la evaluación excéntrica del cuádriceps a 30°/s también resulta especialmente relevante, ya que permite analizar la capacidad del deportista para producir fuerza durante una contracción de alargamiento controlada, condición fundamental en acciones deportivas como la desaceleración, la recepción de saltos, los cambios de dirección y el control del valgo dinámico.
No obstante, la fuerza y la activación voluntaria no deben interpretarse como equivalentes, ya que la fuerza puede mejorar por adaptaciones periféricas, estructurales o técnicas, mientras que el CAR refleja de forma más específica la capacidad del sistema nervioso para activar el músculo [42–46]. Esta distinción es importante porque en la revisión de Hart et al. se observaron déficits de activación del cuádriceps incluso tras reconstrucción del LCA, con valores medios de activación alrededor del 89,2 % en el miembro reconstruido [5].

El trabajo excéntrico y el HSR podrían contribuir a estas mejoras al generar altas demandas de tensión muscular, favorecer el reclutamiento de unidades motoras y exigir un control activo de la contracción [6,38,71]. Además, desde una perspectiva de preparación física, el trabajo excéntrico resulta especialmente interesante porque las contracciones excéntricas requieren un control neural específico durante el alargamiento muscular y pueden asociarse a adaptaciones neuromusculares diferentes a las contracciones concéntricas [38,71]. Estudios recientes sobre entrenamiento excéntrico sugieren incluso que el trabajo a longitudes musculares largas podría

generar mayores adaptaciones corticospinales y espinales que el trabajo en longitudes cortas, lo que refuerza el interés de este tipo de estímulo en un contexto donde la activación voluntaria está alterada [93]. Además, el uso de un tempo lento podría favorecer una producción de fuerza más consciente y controlada, limitando la dependencia del impulso o de mecanismos rápidos asociados al ciclo estiramiento-acortamiento. Este planteamiento se relaciona con los principios del HSR, donde la carga elevada, el control del tempo, el tiempo bajo tensión y los descansos suficientes permiten orientar el estímulo hacia la tensión mecánica y la calidad de ejecución, más que hacia acciones rápidas o elásticas [94].

Otro aspecto relevante del protocolo es la autorregulación de la carga. En pacientes con AMI, la prescripción basada exclusivamente en porcentajes de 1RM puede ser limitada, ya que la fuerza máxima inicial puede estar condicionada por el propio déficit de activación voluntaria [18]. En este sentido, aunque el RIR es una herramienta subjetiva, permite ajustar la intensidad al estado real del paciente en el momento de la sesión, teniendo en cuenta factores como fatiga, dolor, confianza, calidad de contracción o variabilidad diaria del rendimiento [80–84]. Esta característica resulta especialmente útil en rehabilitación, ya que el estado neuromuscular del deportista puede variar entre sesiones y no siempre queda reflejado por un porcentaje fijo de carga. De forma complementaria, el control de la velocidad de ejecución y de la pérdida de velocidad puede aportar información práctica sobre la fatiga neuromuscular y la calidad del rendimiento durante la serie, ya que la velocidad tiende a disminuir progresivamente conforme aumenta la fatiga y se reducen las repeticiones en reserva [64,88–91,95]. Por tanto, si un deportista declara un RIR elevado pero la velocidad de ejecución disminuye de forma marcada, esta discrepancia podría indicar que se encuentra más cerca del fallo muscular de lo que percibe subjetivamente. Por tanto, la combinación de RIR y observación de la velocidad permitiría contrastar la percepción del paciente con una señal externa de rendimiento, evitando depender únicamente de una estimación subjetiva. Este enfoque resulta especialmente pertinente en un contexto de AMI, donde el objetivo no sería alcanzar el fallo muscular de forma sistemática, sino preservar una ejecución técnicamente correcta, suficientemente intensa y compatible con una buena activación voluntaria.

Este planteamiento es coherente con la preparación física moderna, donde las estrategias de autorregulación subjetivas, como el RIR, y objetivas, como el VBT, permiten ajustar la carga en función del estado real del deportista y no únicamente en función de una prescripción fija [96,97]. Además, estudios recientes sugieren que el RIR y el VBT pueden ayudar a mantener el volumen útil de entrenamiento y evitar llegar de forma sistemática al fallo, sin aumentar de manera innecesaria la fatiga neuromuscular [98]. Este punto resulta relevante porque Sonnery-Cottet et al. observaron que determinadas intervenciones basadas en ejercicio podían modificar de forma aguda la activación del cuádriceps, con un aumento del CAR de 81,2 % a 96,0 % tras ejercicios

de fatiga de isquiotibiales [2]. Sin embargo, el objetivo del presente protocolo no sería inducir fatiga de forma indiscriminada, sino utilizar la autorregulación para preservar una ejecución técnicamente correcta, suficientemente intensa y compatible con una buena activación voluntaria. En este sentido, la relación entre repeticiones en reserva y velocidad de ejecución también podría ser útil para ajustar en tiempo real la carga y el volumen de la serie, favoreciendo una mejor gestión de la fatiga durante el proceso de rehabilitación [91].

Respecto al control neuromuscular y la calidad del movimiento, se espera que el grupo experimental obtenga mejores resultados en el Y-Balance Test, el Lateral Step-Down Test, el Single-Leg Squat y el análisis de vídeo mediante Kinovea. Estas pruebas permiten valorar aspectos que no pueden deducirse únicamente de la fuerza máxima, como la estabilidad dinámica, el control del valgo, la alineación del miembro inferior, la estrategia de tronco y la calidad del movimiento durante tareas unipodales [52–59]. Esta diferenciación es importante porque una mejora de la fuerza no garantiza necesariamente una mejora equivalente del control motor o de la calidad del movimiento.
Además, la fatiga puede alterar la ejecución en deportistas tras reconstrucción del LCA, y van Melick et al. observaron que la calidad del movimiento se deterioraba más en jugadores de fútbol reconstruidos de LCA que en controles sanos bajo condiciones de fatiga [26]. Por ello, desde una perspectiva de rendimiento y retorno al deporte, no sería suficiente aumentar la capacidad de producir fuerza si el deportista no es capaz de expresar esa fuerza con buena alineación, control excéntrico, estabilidad dinámica y calidad técnica. Por tanto, una mejora en estas pruebas permitiría interpretar que las posibles ganancias de activación y fuerza se transfieren hacia un mejor control funcional del miembro inferior.

En cuanto a la variable psicológica, evaluada mediante el ACL-RSI, sería razonable esperar una mejora en el grupo experimental si el deportista percibe una mayor capacidad para controlar su rodilla, producir fuerza y realizar tareas funcionales con seguridad. El ACL-RSI permite valorar dimensiones psicológicas relacionadas con el retorno al deporte, como la confianza, las emociones y la percepción de riesgo tras reconstrucción del LCA [19]. No obstante, esta interpretación debe realizarse con prudencia, ya que el protocolo no constituye una intervención psicológica específica. En el estudio de Zunzarren et al., a pesar de observarse un déficit de activación neuromuscular importante a más de tres años de seguimiento, los pacientes presentaban un ACL-RSI medio de aproximadamente 70, junto con valores funcionales relativamente favorables como un KOOS medio de 86,2 e IKDC medio de 84,17 [19]. Esto sugiere que la recuperación psicológica, funcional y neuromuscular no siempre evoluciona de forma paralela. Por ello, una posible mejora del ACL-RSI en el presente protocolo debería interpretarse como un efecto indirecto asociado a la exposición progresiva a tareas funcionales, la mejora del control

neuromuscular y el aumento de la percepción de competencia durante la rehabilitación [62,63,99,100].

Desde el punto de vista clínico, este protocolo podría contribuir a modificar la forma de entender la rehabilitación post-LCA en deportistas de deportes de pivote. Actualmente, muchos criterios de progresión y retorno al deporte se apoyan en medidas de fuerza, simetría, hop tests, control funcional y variables psicológicas, pero la activación voluntaria del cuádriceps no siempre se evalúa de forma específica [18,24,25,29]. Sin embargo, los datos disponibles muestran que pueden persistir déficits de activación incluso cuando los valores funcionales o psicológicos parecen aceptables, como refleja el déficit de activación de aproximadamente 42 % descrito por Zunzarren et al. a más de tres años de seguimiento [19]. Por ello, incluir el CAR como variable principal, junto con la fuerza isocinética, la calidad del movimiento y el ACL-RSI, podría permitir una valoración más completa del estado real del deportista. Desde una perspectiva de preparación física, esta propuesta también permite conectar la rehabilitación con el rendimiento, ya que no se limita a recuperar fuerza aislada, sino que busca mejorar la capacidad de producir fuerza de forma voluntaria, controlada, técnicamente correcta y transferible a tareas deportivas. En este sentido, el protocolo propone pasar de una rehabilitación centrada únicamente en la fuerza y la función hacia un enfoque que integre activación voluntaria, control neuromuscular, calidad de ejecución y preparación para el retorno al deporte.

En cuanto a futuras líneas de investigación, sería necesario realizar previamente un estudio piloto que permita estimar la viabilidad del protocolo, la variabilidad del CAR, la desviación estándar, el porcentaje de pérdidas y los parámetros necesarios para calcular con mayor precisión el tamaño muestral definitivo [42–46]. Este paso resulta especialmente importante porque, aunque un CAR inferior al 95 % se utiliza como criterio de déficit de activación voluntaria, la revisión de Hart et al. mostró una variabilidad relevante en los valores de activación del cuádriceps según la población evaluada, con valores medios aproximados de 87,3 % en LCA lesionado, 89,2 % tras reconstrucción y 98,5 % en controles sanos [5,44].
Asimismo, futuras investigaciones podrían analizar la relación entre el RIR percibido y la velocidad de ejecución en los ejercicios principales del protocolo, con el objetivo de establecer perfiles individuales carga-velocidad-RIR que permitan una prescripción más objetiva e individualizada de la carga durante la rehabilitación [64,91]. En este sentido, sería interesante determinar si determinados valores de velocidad de ejecución o de pérdida de velocidad se corresponden con rangos concretos de repeticiones en reserva en ejercicios específicos del protocolo, como la extensión de rodilla, el belt squat o el split squat, evitando establecer valores universales que podrían variar según el ejercicio, la carga, la máquina utilizada y las características del deportista.

También sería interesante incorporar herramientas como EMG, TMS o EEG para analizar de forma más directa los mecanismos musculares, espinales y corticospinales asociados a la AMI [10,12,15,16,67]. Además, futuros estudios deberían incluir seguimientos a largo plazo para determinar si las mejoras esperadas se mantienen tras finalizar la intervención y si se traducen en un retorno al deporte más seguro [24,25,29] . Finalmente, aunque este protocolo se centra en el cuádriceps tras reconstrucción del LCA, la AMI no parece ser un fenómeno exclusivo de la rodilla, ya que se han descrito alteraciones de excitabilidad y activación en otros contextos, como el esguince lateral de tobillo o la inhibición del glúteo medio tras lesión de LCA [9,101–103]. Por ello, futuras investigaciones podrían explorar la utilidad de evaluar y tratar la AMI en otras articulaciones y poblaciones clínicas.

A la vista de la literatura reciente, la AMI podría estar más presente de lo que habitualmente se considera tras un traumatismo articular. Por ello, en la práctica clínica podría ser prudente contemplar su posible presencia hasta que una evaluación neuromuscular específica demuestre lo contrario.

5. Limitaciones y fortalezas

El presente protocolo presenta varias limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, debido a la naturaleza de la intervención fisioterapéutica, no será posible cegar completamente a los fisioterapeutas ni a los participantes. Esto podría generar un sesgo de expectativa o de desempeño. Para reducir este riesgo, el evaluador de los resultados permanecerá cegado a la asignación de los grupos y, en la medida de lo posible, el análisis estadístico será realizado por un investigador externo.

Otra limitación es que el volumen y el contenido de la intervención no estarán completamente igualados entre ambos grupos. El grupo experimental recibirá un protocolo multimodal específico dirigido a la AMI, mientras que el grupo control seguirá una rehabilitación convencional basada en las recomendaciones actuales. Por tanto, las posibles diferencias observadas podrían deberse no solo a la especificidad del protocolo, sino también a diferencias en la estructura, supervisión o carga total de trabajo. Sin embargo, esta decisión refleja una situación clínica realista, ya que el objetivo del estudio es valorar si una intervención más específica puede aportar beneficios adicionales frente al tratamiento convencional.

Asimismo, el carácter multimodal del protocolo dificulta identificar qué componente concreto de la intervención sería responsable de las posibles mejoras. El programa incluye trabajo de activación, imaginería motora, fortalecimiento HSR, trabajo excéntrico, control neuromuscular,

feedback y autorregulación de la carga. No obstante, esta característica también responde a la naturaleza multifactorial de la AMI, que implica mecanismos periféricos, espinales y supraspinales. La población seleccionada también puede limitar la generalización de los resultados. El estudio se dirige a deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del LCA, por lo que sus resultados no podrán extrapolarse directamente a pacientes sedentarios, deportistas recreacionales o poblaciones con menor demanda funcional. Además, pueden existir diferencias entre participantes en función del tipo de plastia, lesiones asociadas, nivel deportivo o evolución previa de la rehabilitación, lo que podría influir en la respuesta al tratamiento.

Otra limitación importante es la ausencia de seguimiento a largo plazo. Las evaluaciones se realizarán a las 6 y 12 semanas, lo que permitirá analizar la evolución durante la intervención, pero no determinar si las mejoras se mantienen en el tiempo ni si influyen en el retorno real al deporte o en la reducción del riesgo de recidiva.

Finalmente, el uso del CAR como variable principal aporta precisión, pero requiere material específico, formación del evaluador y una correcta estandarización del procedimiento. Además, al no disponer actualmente de valores suficientemente específicos sobre la diferencia mínima clínicamente importante ni la desviación estándar del CAR en esta población, será necesario realizar previamente un estudio piloto para estimar la variabilidad, el efecto esperado y el tamaño muestral definitivo.

A pesar de estas limitaciones, el protocolo presenta varias fortalezas. En primer lugar, se propone un diseño de ensayo clínico aleatorizado, controlado, prospectivo y longitudinal, siguiendo las recomendaciones SPIRIT, lo que mejora la calidad metodológica del estudio. Además, la presencia de un grupo control basado en la rehabilitación convencional permite comparar la intervención propuesta con una práctica clínica habitual.

Otra fortaleza es la elección del CAR como variable principal, ya que permite evaluar directamente la activación voluntaria del cuádriceps y no únicamente la fuerza muscular o la función. Esto resulta especialmente relevante, ya que la AMI no debe interpretarse como una simple debilidad muscular, sino como una alteración neurofisiológica de la activación voluntaria.

Además, el protocolo propone una intervención específica, multimodal y progresiva, centrada en la calidad de activación, el control motor y la autorregulación de la carga. La combinación de variables de fuerza, control neuromuscular, calidad del movimiento y preparación psicológica permite obtener una visión global de la recuperación del deportista. Por último, la progresión basada en criterios clínicos y funcionales, y no únicamente en el tiempo postoperatorio, aumenta la aplicabilidad clínica del protocolo y favorece una rehabilitación más individualizada.

6. Conclusión

El presente trabajo propone un protocolo de ensayo clínico aleatorizado dirigido a evaluar la eficacia de una intervención multimodal de fisioterapia sobre la inhibición muscular artrogénica del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior. Esta propuesta nace de la necesidad de abordar la AMI no solo como un déficit de fuerza, sino como una alteración neuromuscular compleja que puede limitar la activación voluntaria del cuádriceps, la recuperación funcional y el retorno seguro al deporte.

Se espera que el grupo experimental obtenga mayores mejoras en la activación voluntaria del cuádriceps, evaluada mediante el Central Activation Ratio, así como en la fuerza muscular, el control funcional y las variables relacionadas con el retorno al deporte, en comparación con el grupo control, en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior.

La principal aportación de este trabajo es la elaboración de una propuesta estructurada, reproducible y clínicamente aplicable, orientada a cubrir una brecha existente en la rehabilitación post-LCA: el tratamiento específico de la inhibición muscular artrogénica.

Aunque el protocolo no ha sido implementado, su diseño puede servir como base para futuras investigaciones dirigidas a evaluar la eficacia clínica de intervenciones multimodales centradas en la AMI en población deportiva.

7. Bibliografía

[1] Hopkins JT, Ingersoll CD. Arthrogenic muscle inhibition: A limiting factor in joint rehabilitation. J Sport Rehabil 2000;9:135–59. https://doi.org/10.1123/jsr.9.2.135.

[2] Sonnery-Cottet B, Saithna A, Quelard B, Daggett M, Borade A, Ouanezar H, et al. Arthrogenic muscle inhibition after ACL reconstruction: A scoping review of the efficacy of interventions. Br J Sports Med 2019;53:289–98. https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098401.

[3] Sonnery-Cottet B, Hopper GP, Gousopoulos L, Vieira TD, Thaunat M, Fayard J-M, et al. Arthrogenic Muscle Inhibition Following Knee Injury or Surgery: Pathophysiology, Classification, and Treatment. Video Journal of Sports Medicine 2022;2. https://doi.org/10.1177/26350254221086295.

[4] McPherson AL, Schilaty ND, Anderson S, Nagai T, Bates NA. Arthrogenic muscle inhibition after anterior cruciate ligament injury: Injured and uninjured limb recovery over time. Front Sports Act Living 2023;5. https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1143376.

[5] Hart JM, Pietrosimone B, Hertel J, Ingersoll CD. Quadriceps Activation Following Knee Injuries: A Systematic Review. 2010. https://doi.org/10.4085/1062-6050-45.1.87.

[6] Lepley LK, Wojtys EM, Palmieri-Smith RM. Combination of eccentric exercise and neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps function post-ACL reconstruction. Knee 2015;22:270–7. https://doi.org/10.1016/j.knee.2014.11.013.

[7] Johnson AK, McCollin T, Garcia SA, Wojtys EM, Krishnan C, Palmieri-Smith RM. Relationship Between Knee-Joint Effusion and Quadriceps Strength and Activation After Anterior Cruciate Ligament Injury and Reconstruction. J Athl Train 2025;60:502–9. https://doi.org/10.4085/1062-6050-0294.24.

[8] Lepley AS, Lepley LK. Mechanisms of Arthrogenic Muscle Inhibition. J Sport Rehabil 2022;31:707–16. https://doi.org/10.1123/jsr.2020-0479.

[9] Kim KM, Kim JS, Cruz-Díaz D, Ryu S, Kang M, Taube W. Changes in spinal and corticospinal excitability in patients with chronic ankle instability: A systematic review with meta-analysis. J Clin Med 2019;8. https://doi.org/10.3390/jcm8071037.

[10] Patel HH, Berlinberg EJ, Nwachukwu B, Williams RJ, Mandelbaum B, Sonkin K, et al. Quadriceps Weakness is Associated with Neuroplastic Changes Within Specific Corticospinal Pathways and Brain Areas After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Theoretical Utility of Motor Imagery-Based Brain-Computer Interface Technology for Rehabilitation. Arthrosc Sports Med Rehabil 2023;5:e207–16. https://doi.org/10.1016/j.asmr.2022.11.015.

[11] Grooms D, Gregory Appelbaum C, Onate J. Neuroplasticity Following Anterior Cruciate Ligament Injury: 2 A Framework for Visual-Motor Training Approaches in Rehabilitation. 2015. https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5549.

[12] Neto T, Sayer T, Theisen D, Mierau A. Functional brain plasticity associated with ACL injury: A scoping review of current evidence. Neural Plast 2019;2019. https://doi.org/10.1155/2019/3480512.

[13] Needle AR, Howard JS, Downing MB, Skinner JW. Neural-Targeted Rehabilitation Strategies to Address Neuroplasticity After Joint Injury. J Athl Train 2024;59:1187–96. https://doi.org/10.4085/1062-6050-0215.23.

[14] Larson D, Vu V, Ness BM, Wellsandt E, Morrison S. A Multi-Systems Approach to Human Movement after ACL Reconstruction: The Musculoskeletal System. Int J Sports Phys Ther 2022;17:27–46. https://doi.org/10.26603/001c.29456.

[15] Sherman DA, Rush J, Glaviano NR, Norte GE. Knee joint pathology and efferent pathway dysfunction: Mapping muscle inhibition from motor cortex to muscle force. Musculoskelet Sci Pract 2024;74. https://doi.org/10.1016/j.msksp.2024.103204.

[16] Sherman DA, Beausejour JP, Koohestani M, Stock MS, Norte GE. Quadriceps motor unit properties following ACL reconstruction are associated with corticospinal excitability and motor cortex activations. J Appl Physiol 2025;138:1011–23. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00641.2024.

[17] Palmieri-Smith RM, Lepley LK. Quadriceps strength asymmetry after anterior cruciate ligament reconstruction alters knee joint biomechanics and functional performance at time of return to activity. American Journal of Sports Medicine 2015;43:1662–9. https://doi.org/10.1177/0363546515578252.
[18] Forelli F, Moiroux-Sahraoui A, Mazeas J, Dugernier J, Cerrito A. Rethinking the Assessment of Arthrogenic Muscle Inhibition After ACL Reconstruction: Implications for Return-to-Sport Decision-Making—A Narrative Review. J Clin Med 2025;14. https://doi.org/10.3390/jcm14082633.
[19] Zunzarren G, Garet B, Vinciguerra B, Murgier J. Persistence of neuromuscular activation deficit in the lower limb at 3-years of follow-up after ACL reconstruction surgery. Knee 2023;43:97–105. https://doi.org/10.1016/j.knee.2023.06.006.
[20] Kennedy MJ, Leung CS, Soh TCF, Sitton-Kent H, Thomson HJ, Hill O, et al. The incidence of arthrogenic muscle inhibition in acute knee injuries: a prospective cohort study in a tertiary acute knee unit. Asia Pac J Sports Med Arthrosc Rehabil Technol 2025;42:62–7. https://doi.org/10.1016/j.asmart.2025.08.005.
[21] Sonnery-Cottet B, Barrera Uso M, Coquard M, Thaunat M, Fayard JM, Freychet B, et al. Incidence and Risk Factors for Arthrogenic Muscle Inhibition in the Early Postoperative Period After ACL Reconstruction. A Cohort Study From the SANTI Study Group. Orthop J Sports Med 2026;14. https://doi.org/10.1177/23259671251350305.
[22] Forelli F, Demangeot Y, Dourver A, Cerrito A. Early Postoperative Evaluation of Arthrogenic Muscle Inhibition, Anterior Knee Laxity, and Kinesiophobia After ACL Reconstruction: A Cross-Sectional Observational Study. Healthcare (Switzerland) 2025;13. https://doi.org/10.3390/healthcare13131481.
[23] Moiroux-Sahraoui A, Forelli F, Mazeas J, Rambaud AJM, Bjerregaard A, Riera J. Quadriceps Activation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: The Early Bird Gets the Worm! Int J Sports Phys Ther 2024;19:1044–51. https://doi.org/10.26603/001c.121423.
[24] Meredith SJ, Rauer T, Chmielewski TL, Fink C, Diermeier T, Rothrauff BB, et al. Return to sport after anterior cruciate ligament injury: Panther Symposium ACL Injury Return to Sport Consensus Group. Journal of ISAKOS 2021;6:138–46. https://doi.org/10.1136/jisakos-2020-000495.
[25] Golberg E, Sommerfeldt M, Pinkoski A, Dennett L, Beaupre L. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Return-to-Sport Decision-Making: A Scoping Review. Sports Health 2024;16:115–23. https://doi.org/10.1177/19417381221147524.
[26] van Melick N, van Rijn L, Nijhuis-van der Sanden MWG, Hoogeboom TJ, van Cingel REH. Fatigue affects quality of movement more in ACL-reconstructed soccer players than in healthy soccer players. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy 2019;27:549–55. https://doi.org/10.1007/s00167-018-5149-2.
[27] Kim M, Gu M, Kim HY, Kim J, Lee JH, Lee HY. Assessment of arthrogenic quadriceps muscle inhibition by physical examination in the supine position during isometric contraction is feasible as demonstrated by electromyography: a cross-sectional study. J Orthop Surg Res 2024;19. https://doi.org/10.1186/s13018-024-04949-9.
[28] Wright RW, Haas AK, Anderson J, Calabrese G, Cavanaugh J, Hewett TE, et al. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Rehabilitation: MOON Guidelines. Sports Health 2015;7:239–43. https://doi.org/10.1177/1941738113517855.
[29] Kotsifaki R, Korakakis V, King E, Barbosa O, Maree D, Pantouveris M, et al. Aspetar clinical practice guideline on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. Br J Sports Med 2023;57:500–14. https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106158.
[30] Brinlee AW, Dickenson SB, Hunter-Giordano A, Snyder-Mackler L. ACL Reconstruction Rehabilitation: Clinical Data, Biologic Healing, and Criterion-Based Milestones to Inform a Return-to-Sport Guideline. Sports Health 2022;14:770–9. https://doi.org/10.1177/19417381211056873.
[31] Paço M, Peysson M, Dumont E, Correia M, Quialheiro A, Chaves P. The Effect of Physiotherapy on Arthrogenic Muscle Inhibition After ACL Injury or Reconstruction: A Systematic Review 2024;14. https://doi.org/10.3390/life14121586.

[32] Friedmann-Bette B, Profit F, Gwechenberger T, Weiberg N, Parstorfer M, Weber MA, et al. Strength Training Effects on Muscular Regeneration after ACL Reconstruction. Med Sci Sports Exerc 2018;50:1152–61. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001564.
[33] Li Z, Jin L, Chen Z, Shang Z, Geng Y, Tian S, et al. Effects of Neuromuscular Electrical Stimulation on Quadriceps Femoris Muscle Strength and Knee Joint Function in Patients After ACL Surgery: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. Orthop J Sports Med 2025;13. https://doi.org/10.1177/23259671241275071.
[34] Harkey MS, Gribble PA, Pietrosimone BG. Disinhibitory interventions and voluntary quadriceps activation: A systematic review. J Athl Train 2014;49:411–21. https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.1.04.
[35] Murphy MC, Sylvester C, Whife C, D'Alessandro P, Rio EK, Vallence AM. Anodal transcranial direct current stimulation (tDCS) modulates quadriceps motor cortex inhibition and facilitation during rehabilitation following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: a triple-blind, randomised controlled proof of concept trial. BMJ Open Sport Exerc Med 2024;10. https://doi.org/10.1136/bmjsem-2024-002080.
[36] Oda S, Izumi M, Takaya S, Tadokoro N, Aso K, Petersen KK, et al. Promising effect of visually-assisted motor imagery against arthrogenic muscle inhibition-a human experimental pain study. J Pain Res 2021;14:285–95. https://doi.org/10.2147/JPR.S282736.
[37] Roig M, O'Brien K, Kirk G, Murray R, McKinnon P, Shadgan B, et al. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: A systematic review with meta-analysis. Br J Sports Med 2009;43:556–68. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.051417.
[38] Duchateau J, Enoka RM. Neural control of lengthening contractions. Journal of Experimental Biology 2016;219:197–204. https://doi.org/10.1242/jeb.123158.
[39] Wang J, Jia Y, Li Q, Li L, Dong Q, Fu Q. Advances in Research on Brain Structure and Activation Characteristics in Patients with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. Brain Sci 2025;15. https://doi.org/10.3390/brainsci15080831.
[40] Moiroux--Sahraoui A, Mazeas J, Gold M, Kakavas G, Forelli F. Neuromuscular Control Deficits After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Pilot Study Using Single-Leg Functional Tests and Electromyography. J Funct Morphol Kinesiol 2025;10. https://doi.org/10.3390/jfmk10010098.
[41] Şeyma Torgutalp Ş, Dönmez G, Korkusuz F. Incidence rates of injuries associated with anterior cruciate ligament tear diagnosed by magnetic resonance imaging: A retrospective cohort study. Turkish Journal of Sports Medicine 2020;56:33–7. https://doi.org/10.47447/tjsm.0475.
[42] Norte GE, Frye JL, Hart JM. Reliability of the Superimposed-Burst Technique in Patients With Patellofemoral Pain: A Technical Report. J Athl Train 2015;50:1207–11. https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.10.03.
[43] Krishnan C, Williams GN. Quantification method affects estimates of voluntary quadriceps activation. Muscle Nerve 2010;41:868–74. https://doi.org/10.1002/mus.21613.
[44] Park J, Ty Hopkins J. Quadriceps activation normative values and the affect of subcutaneous tissue thickness. Journal of Electromyography and Kinesiology 2011;21:136–40. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.09.007.
[45] Garcia SA, Rodriguez KM, Brown SR, Palmieri-Smith RM, Krishnan C. Estimates of voluntary activation in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: Effects of type of stimulator, number of stimuli, and quantification technique. J Sport Health Sci 2022;11:85–93. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2019.12.001.
[46] Lisee C, Lepley AS, Birchmeier T, O'Hagan K, Kuenze C. Quadriceps Strength and Volitional Activation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. Sports Health: A Multidisciplinary Approach 2019;11:163–79. https://doi.org/10.1177/1941738118822739.
[47] Tsiros MD, Grimshaw PN, Schield AJ, Buckley JD. Test-retest reliability of the Biodex System 4 Isokinetic Dynamometer for knee strength assessment in paediatric populations. J Allied Health 2011;40:115–9.

[48] Feiring DC, Ellenbecker TS, Derscheid GL. Test-Retest Reliability of the Biodex Isokinetic Dynamometer. 1990.
[49] Welling W, Benjaminse A, Seil R, Lemmink K, Zaffagnini S, Gokeler A. Low rates of patients meeting return to sport criteria 9 months after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective longitudinal study. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy 2018;26:3636–44. https://doi.org/10.1007/s00167-018-4916-4.
[50] Wilk KE, Arrigo CA, Davies GJ. Isokinetic Testing: Why it is More Important Today than Ever. Int J Sports Phys Ther 2024;19. https://doi.org/10.26603/001c.95038.
[51] Garrison JC, Bothwell JM, Wolf G, Aryal S, Thigpen CA. Y BALANCE TEST™ ANTERIOR REACH SYMMETRY AT THREE MONTHS IS RELATED TO SINGLE LEG FUNCTIONAL PERFORMANCE AT TIME OF RETURN TO SPORTS FOLLOWING ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT RECONSTRUCTION. Int J Sports Phys Ther 2015;10:602–11.
[52] Kim JS, Hwang UJ, Choi MY, Kong DH, Chung KS, Ha JK, et al. Correlation Between Y-Balance Test and Balance, Functional Performance, and Outcome Measures in Patients Following ACL Reconstruction. Int J Sports Phys Ther 2022;17:193–200. https://doi.org/10.26603/001c.31873.
[53] Kim JG, Lee DW, Bae KC, Choi BC, Yang SJ, Cho SI, et al. Correlation of Y Balance with Clinical Scores and Functional Tests after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Young and Middle-Aged Patients. CiOS Clinics in Orthopedic Surgery 2023;15:50–8. https://doi.org/10.4055/cios21131.
[54] Jamaludin NI, Sahabuddin FNA, Rasudin NS, Shaharudin S. The Concurrent Validity and Reliability of Single Leg Squat Among Physically Active Females with and without Dynamic Knee Valgus. Int J Sports Phys Ther 2022;17:574–84. https://doi.org/10.26603/001C.35706.
[55] Ressman J, Grooten WJA, Rasmussen-Barr E. Visual assessment of movement quality: a study on intra- and interrater reliability of a multi-segmental single leg squat test. BMC Sports Sci Med Rehabil 2021;13. https://doi.org/10.1186/s13102-021-00289-x.
[56] Ressman J, Grooten WJA, Rasmussen Barr E. Visual assessment of movement quality in the single leg squat test: A review and meta-analysis of inter-rater and intrarater reliability. BMJ Open Sport Exerc Med 2019;5. https://doi.org/10.1136/bmjsem-2019-000541.
[57] Abrams GD, Harris JD, Gupta AK, McCormick FM, Bush-Joseph CA, Verma NN, et al. Functional performance testing after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. Orthop J Sports Med 2014;2. https://doi.org/10.1177/2325967113518305.
[58] Kline PW, Johnson DL, Ireland ML, Noehren B. Clinical predictors of knee mechanics at return to sport after ACL reconstruction. Med Sci Sports Exerc 2016;48:790–5. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000856.
[59] Roe C, Jacobs C, Kline P, Lucas K, Johnson D, Ireland ML, et al. Correlations of Single-Leg Performance Tests to Patient-Reported Outcomes after Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Clinical Journal of Sport Medicine 2021;31:E265–70. https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000780.
[60] Webster KE, Feller JA. Development and Validation of a Short Version of the Anterior Cruciate Ligament Return to Sport After Injury (ACL-RSI) Scale. Orthop J Sports Med 2018;6. https://doi.org/10.1177/2325967118763763.
[61] Webster KE, Feller JA, Lambros C. Development and preliminary validation of a scale to measure the psychological impact of returning to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery. Physical Therapy in Sport 2008;9:9–15. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2007.09.003.
[62] Webster KE, Feller JA. Evaluation of the Responsiveness of the Anterior Cruciate Ligament Return to Sport After Injury (ACL-RSI) Scale. Orthop J Sports Med 2021;9. https://doi.org/10.1177/23259671211031240.
[63] Slagers AJ, van den Akker-Scheek I, Geertzen JHB, Zwerver J, Reininga IHF. Responsiveness of the anterior cruciate ligament–Return to Sports after Injury (ACL-RSI) and Injury–Psychological Readiness to Return to Sport (I-PRRS) scales. J Sports Sci 2019;37:2499–505. https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1646023.

[64] Forelli F, Marine P, Moiroux-Sahraoui A, Mazeas J, Thoelen M, Swinnen B, et al. Velocity-based training in mid- and late-stage rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: a narrative review and practical guidelines. BMJ Open Sport Exerc Med 2025;11. https://doi.org/10.1136/bmjsem-2025-002503.
[65] Andrade R, Pereira R, Van Cingel R, Staal JB, Espregueira-Mendes J. How should clinicians rehabilitate patients after ACL reconstruction? A systematic review of clinical practice guidelines (CPGs) with a focus on quality appraisal (AGREE II). Br J Sports Med 2020;54:512–9. https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100310.
[66] Paravlic AH. Motor Imagery and Action Observation as Appropriate Strategies for Home-Based Rehabilitation: A Mini-Review Focusing on Improving Physical Function in Orthopedic Patients. Front Psychol 2022;13. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.826476.
[67] Rush JL, Glaviano NR, Norte GE. Assessment of Quadriceps Corticomotor and Spinal-Reflexive Excitability in Individuals with a History of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. Sports Medicine 2021;51:961–90. https://doi.org/10.1007/s40279-020-01403-8.
[68] Pastora-Bernal JM, Estebanez-Pérez MJ, Lucena-Anton D, García-López FJ, Bort-Carballo A, Martín-Valero R. The Effectiveness and Recommendation of Motor Imagery Techniques for Rehabilitation after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. J Clin Med 2021;10:428. https://doi.org/10.3390/jcm10030428.
[69] Lebon F, Guillot A, Collet C. Increased Muscle Activation Following Motor Imagery During the Rehabilitation of the Anterior Cruciate Ligament. Appl Psychophysiol Biofeedback 2012;37:45–51. https://doi.org/10.1007/s10484-011-9175-9.
[70] Welling W, Benjaminse A, Lemmink K, Dingenen B, Gokeler A. Progressive strength training restores quadriceps and hamstring muscle strength within 7 months after ACL reconstruction in amateur male soccer players. Physical Therapy in Sport 2019;40:10–8. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2019.08.004.
[71] Lepley LK, Lepley AS, Onate JA, Grooms DR. Eccentric Exercise to Enhance Neuromuscular Control. Sports Health: A Multidisciplinary Approach 2017;9:333–40. https://doi.org/10.1177/1941738117710913.
[72] Lepley LK, Grooms DR, Burland JP, Davi SM, Mosher JL, Cormier ML, et al. Eccentric cross-exercise after anterior cruciate ligament reconstruction: Novel case series to enhance neuroplasticity. Physical Therapy in Sport 2018;34:55–65. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2018.08.010.
[73] Stojanović MDM, Andrić N, Mikić M, Vukosav N, Vukosav B, Zolog-Șchiopea D-N, et al. Effects of Eccentric-Oriented Strength Training on Return to Sport Criteria in Late-Stage Anterior Cruciate Ligament (ACL)-Reconstructed Professional Team Sport Players. Medicina (B Aires) 2023;59:1111. https://doi.org/10.3390/medicina59061111.
[74] Milandri G, Sivarasu S. A Randomized Controlled Trial of Eccentric Versus Concentric Cycling for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Rehabilitation. Am J Sports Med 2021;49:626–36. https://doi.org/10.1177/0363546520987566.
[75] Vidmar MF, Baroni BM, Michelin AF, Mezzomo M, Lugokenski R, Pimentel GL, et al. Isokinetic eccentric training is more effective than constant load eccentric training for quadriceps rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. Braz J Phys Ther 2020;24:424–32. https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2019.07.003.
[76] Méndez-Bouza M, Alonso-Calvete A, Abalo-Núñez R. Efficacy of perturbation-based balance training in anterior cruciate ligament tears. A systematic review. Apunts Sports Medicine 2023;58:100411. https://doi.org/10.1016/j.apunsm.2023.100411.
[77] Singh H, Gokeler A, Benjaminse A. Effective Attentional Focus Strategies after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Commentary. Int J Sports Phys Ther 2021;16. https://doi.org/10.26603/001c.29848.
[78] Gokeler A, Neuhaus D, Benjaminse A, Grooms DR, Baumeister J. Principles of Motor Learning to Support Neuroplasticity After ACL Injury: Implications for Optimizing Performance and Reducing Risk of Second ACL Injury. Sports Medicine 2019;49:853–65. https://doi.org/10.1007/s40279-019-01058-0.

[79] Gokeler A, Benjaminse A, Hewett TE, Paterno M V., Ford KR, Otten E, et al. Feedback Techniques to Target Functional Deficits Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Implications for Motor Control and Reduction of Second Injury Risk. Sports Medicine 2013;43:1065–74. https://doi.org/10.1007/s40279-013-0095-0.

[80] Helms ER, Cronin J, Storey A, Zourdos MC. Application of the Repetitions in Reserve-Based Rating of Perceived Exertion Scale for Resistance Training. Strength Cond J 2016;38:42–9. https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000218.

[81] Zourdos MC, Klemp A, Dolan C, Quiles JM, Schau KA, Jo E, et al. Novel Resistance Training–Specific Rating of Perceived Exertion Scale Measuring Repetitions in Reserve. J Strength Cond Res 2016;30:267–75. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001049.

[82] Maroto-Izquierdo S, López-Ortiz S, Peñín-Grandes S, Santos-Lozano A. Repetitions in Reserve: An Emerging Method for Strength Exercise Prescription in Special Populations. Strength Cond J 2025;47:317–27. https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000876.

[83] Helms ER, Byrnes RK, Cooke DM, Haischer MH, Carzoli JP, Johnson TK, et al. RPE vs. Percentage 1RM Loading in Periodized Programs Matched for Sets and Repetitions. Front Physiol 2018;9. https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00247.

[84] Lovegrove S, Hughes LJ, Mansfield SK, Read PJ, Price P, Patterson SD. Repetitions in Reserve Is a Reliable Tool for Prescribing Resistance Training Load. J Strength Cond Res 2022;36:2696–700. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003952.

[85] Grgic J, Schoenfeld BJ, Orazem J, Sabol F. Effects of resistance training performed to repetition failure or non-failure on muscular strength and hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. J Sport Health Sci 2022;11:202–11. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.01.007.

[86] Vieira AF, Umpierre D, Teodoro JL, Lisboa SC, Baroni BM, Izquierdo M, et al. Effects of Resistance Training Performed to Failure or Not to Failure on Muscle Strength, Hypertrophy, and Power Output: A Systematic Review With Meta-Analysis. J Strength Cond Res 2021;35:1165–75. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003936.

[87] Refalo MC, Helms ER, Hamilton DL, Fyfe JJ. Influence of Resistance Training Proximity-to-Failure, Determined by Repetitions-in-Reserve, on Neuromuscular Fatigue in Resistance-Trained Males and Females. Sports Med Open 2023;9:10. https://doi.org/10.1186/s40798-023-00554-y.

[88] Rodríguez-Rosell D, Yáñez-García JM, Mora-Custodio R, Pareja-Blanco F, Ravelo-García AG, Ribas-Serna J, et al. Velocity-based resistance training: impact of velocity loss in the set on neuromuscular performance and hormonal response. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism 2020;45:817–28. https://doi.org/10.1139/apnm-2019-0829.

[89] Pareja-Blanco F, Rodríguez-Rosell D, Sánchez-Medina L, Sanchis-Moysi J, Dorado C, Mora-Custodio R, et al. Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations. Scand J Med Sci Sports 2017;27:724–35. https://doi.org/10.1111/sms.12678.

[90] Jukic I, Castilla AP, Ramos AG, Van Hooren B, McGuigan MR, Helms ER. The Acute and Chronic Effects of Implementing Velocity Loss Thresholds During Resistance Training: A Systematic Review, Meta-Analysis, and Critical Evaluation of the Literature. Sports Medicine 2023;53:177–214. https://doi.org/10.1007/s40279-022-01754-4.

[91] Jukic I, Prnjak K, Helms ER, McGuigan MR. Modeling the repetitions-in-reserve-velocity relationship: a valid method for resistance training monitoring and prescription, and fatigue management. Physiol Rep 2024;12. https://doi.org/10.14814/phy2.15955.

[92] Tuominen J, Leppänen M, Jarske H, Pasanen K, Vasankari T, Parkkari J. Test–Retest Reliability of Isokinetic Ankle, Knee and Hip Strength in Physically Active Adults Using Biodex System 4 Pro. Methods Protoc 2023;6. https://doi.org/10.3390/mps6020026.

[93] Colard J, Betus Y, Tallio T, Bizet B, Nordez A, Jubeau M, et al. Eccentric training at long muscle lengths induces greater corticospinal and spinal reflex plasticity than eccentric training at short muscle lengths. Exp Physiol 2025;110:1990–2006. https://doi.org/10.1113/EP092470.

[94] Morrison S, Cook J. Putting "Heavy" into Heavy Slow Resistance. Sports Medicine 2022;52:1219–22. https://doi.org/10.1007/s40279-022-01641-y.

[95] Jukic I, Helms ER, McGuigan MR, García-Ramos A. Using cluster and rest redistribution set structures as alternatives to resistance training prescription method based on velocity loss thresholds. PeerJ 2022;10:e13195. https://doi.org/10.7717/peerj.13195.
[96] Suchomel TJ, Nimphius S, Bellon CR, Hornsby WG, Stone MH. Training for Muscular Strength: Methods for Monitoring and Adjusting Training Intensity. Sports Medicine 2021;51:2051–66. https://doi.org/10.1007/s40279-021-01488-9.
[97] Larsen S, Kristiansen E, van den Tillaar R. Effects of subjective and objective autoregulation methods for intensity and volume on enhancing maximal strength during resistance-training interventions: a systematic review. PeerJ 2021;9:e10663. https://doi.org/10.7717/peerj.10663.
[98] Cowley N, Nicholson V, Timmins R, Munteanu G, Wood T, García-Ramos A, et al. The Effects of Percentage-Based, Rating of Perceived Exertion, Repetitions in Reserve, and Velocity-Based Training on Performance and Fatigue Responses. J Strength Cond Res 2025;39:e516–29. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000005026.
[99] Webster KE, Feller JA. Psychological Readiness to Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in the Adolescent Athlete. J Athl Train 2022;57:955–60. https://doi.org/10.4085/1062-6050-0543.21.
[100] Nedder VJ, Raju AG, Moyal AJ, Calcei JG, Voos JE. Impact of Psychological Factors on Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. Sports Health 2025;17:291–8. https://doi.org/10.1177/19417381241256930.
[101] Kim KM, Kim JS, Needle AR. Soleus arthrogenic muscle inhibition following acute lateral ankle sprain correlates with symptoms and ankle disability but not with postural control. J Sport Health Sci 2024;13:559–68. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2024.02.005.
[102] Kim JS, Kim KM, Chang E, Jung HC, Lee JM, Needle AR. Spinal Reflex Excitability of Lower Leg Muscles Following Acute Lateral Ankle Sprain: Bilateral Inhibition of Soleus Spinal Reflex Excitability. Healthcare (Switzerland) 2022;10. https://doi.org/10.3390/healthcare10071171.
[103] Tarchichi J, Zalaket J, Graveleau N, Laboudie P, Bouguennec N. Evidence for arthrogenic inhibition of the gluteus medius after anterior cruciate ligament injury: A systematic review. J Exp Orthop 2025;12. https://doi.org/10.1002/jeo2.70551.

8. Anexos

Anexo 1. Hoja informativa al participante

Título del proyecto

Efectividad de un protocolo multimodal de rehabilitación de 12 semanas dirigido a reducir la inhibición muscular artrogénica del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior: protocolo de ensayo clínico aleatorizado.

Investigador principal	Tutor académico
Guillaume Bonnemason-Carrère Alumno del Grado en Fisioterapia, Universidad San Jorge	Alberto Rubio Peiroten

1. Información general

Se le invita a participar en un proyecto de investigación desarrollado en el marco del Trabajo Fin de Grado de Fisioterapia de la Universidad San Jorge. Antes de decidir si desea participar, deberá leer esta hoja informativa, resolver todas sus dudas con el investigador y firmar el consentimiento informado en caso de aceptar su participación.

La participación en el estudio es completamente voluntaria. Puede rechazar participar o retirarse en cualquier momento, sin necesidad de justificar su decisión y sin que ello suponga ninguna consecuencia negativa.

2. Objetivo del estudio

El objetivo de este estudio es evaluar la eficacia de un protocolo multimodal de rehabilitación de 12 semanas dirigido a reducir la inhibición muscular artrogénica del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior.

La inhibición muscular artrogénica consiste en una dificultad del sistema nervioso para activar completamente el músculo cuádriceps, incluso cuando el deportista intenta contraerlo de forma voluntaria. Esta alteración puede limitar la recuperación de la fuerza, el control neuromuscular y la progresión hacia el retorno al deporte.

3. Participación y procedimiento

Si acepta participar, se comprobará que cumple los criterios de selección del estudio. Posteriormente, será asignado de forma aleatoria a uno de los dos grupos:

Grupo control: realizará una rehabilitación convencional tras reconstrucción del LCA.

Grupo experimental: realizará un protocolo multimodal específico dirigido a reducir la AMI del cuádriceps.

La intervención tendrá una duración de 12 semanas. Se realizarán evaluaciones en tres momentos: antes de iniciar la intervención, a las 6 semanas y al finalizar las 12 semanas.

Las valoraciones incluirán la medición de la activación voluntaria del cuádriceps mediante el Central Activation Ratio, la fuerza muscular mediante dinamometría isocinética, pruebas funcionales de control neuromuscular como el Y-Balance Test, el Lateral Step-Down Test y el Single-Leg Squat, y el cuestionario ACL-RSI relacionado con la preparación psicológica para el retorno al deporte.

4. Posibles riesgos o molestias

La participación puede implicar molestias leves relacionadas con el ejercicio físico y las pruebas de valoración, como fatiga muscular, agujetas, sensación de esfuerzo, molestias leves en la rodilla o incomodidad asociada a la estimulación eléctrica utilizada para evaluar la activación voluntaria del cuádriceps.

Para minimizar estos riesgos, todas las pruebas y sesiones serán supervisadas por profesionales cualificados. La carga será adaptada a la tolerancia individual, al dolor, a la fatiga, a la calidad del movimiento y a la respuesta articular.

5. Beneficios esperados

No se puede garantizar un beneficio directo por participar en el estudio. Sin embargo, su participación puede contribuir a mejorar el conocimiento científico sobre la rehabilitación tras reconstrucción del LCA y sobre el abordaje específico de la inhibición muscular artrogénica del cuádriceps.

6. Confidencialidad y protección de datos

Los datos recogidos serán tratados de forma confidencial y codificada, de acuerdo con la normativa vigente en materia de protección de datos. La identidad de los participantes no será revelada en ningún informe, publicación o comunicación científica derivada del estudio.

Los resultados podrán ser utilizados con fines académicos y científicos, siempre de forma anónima y agrupada, sin permitir la identificación individual de los participantes.

7. Retirada del estudio

El participante podrá retirarse del estudio en cualquier momento, sin necesidad de dar explicaciones. En caso de retirada, podrá solicitar que no se utilicen sus datos, siempre que sea posible según el estado del análisis.

8. Contacto

Para cualquier duda relacionada con el estudio, podrá contactar con el investigador principal:

Guillaume Bonnemason-Carrère

Correo electrónico: Alu148829@usj.es

Anexo 2. Consentimiento informado

TÍTULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

Efectividad de un protocolo multimodal de rehabilitación de 12 semanas dirigido a reducir la inhibición muscular artrogénica del cuádriceps en deportistas de alto nivel de deportes de pivote tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior: protocolo de ensayo clínico aleatorizado

Para satisfacción de los Derechos del Paciente/Participante, y en cumplimiento de la normativa vigente en materia de investigación:

Yo, D/Dña. _____, como paciente/participante, en pleno uso de mis facultades, libre y voluntariamente,

EXPONGO:

- Que he leído la hoja de información que se me ha entregado.
- He recibido información suficiente sobre el proyecto por parte de D/Dña. _____, en entrevista personal realizada el día ____ / ____ / _____, y he podido hacer preguntas sobre el estudio.
- Comprendo que mi participación es voluntaria y puedo retirarme del estudio cuando quiera, sin tener que dar explicaciones y sin que esto tenga repercusiones negativas para mí.

En consecuencia:

OTORGO LIBREMENTE MI CONSENTIMIENTO para participar en el proyecto y para el acceso y utilización de mis datos conforme a lo indicado en la hoja de información al participante que se me ha entregado.

He recibido una copia firmada del presente consentimiento informado.

De acuerdo con el Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de abril de 2016 de Protección de Datos (RGPD) y la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales, el participante queda informado de que el Responsable del tratamiento de sus datos personales será FUNDACIÓN UNIVERSIDAD SAN JORGE.

Todos los datos personales, incluidos los clínicos en su caso, serán tratados por el equipo investigador conforme a las leyes en vigor en la materia únicamente con fines estadísticos, científicos y de investigación, para extraer conclusiones del proyecto en el que participa.

Los datos recogidos para el estudio estarán identificados mediante un código de manera que no se pueda identificar a los participantes y su identidad no será revelada de ninguna manera excepto en los casos legalmente previstos. Cualquier publicación de los resultados de la investigación, estadísticos o científicos, reflejará únicamente datos disociados que impidan la identificación de los participantes en el estudio.

Como participante en el estudio puede ejercitar sus derechos de acceso, modificación, oposición, cancelación, limitación del tratamiento y portabilidad, dirigiéndose al Delegado de Protección de Datos de la Universidad en el domicilio social de USJ sito en Autovía A-23 Zaragoza- Huesca, km. 299, 50830-Villanueva de Gállego (Zaragoza), o la dirección de correo electrónico privacidad@usj.es., acreditando suficientemente su identidad. Asimismo, tiene derecho a dirigirse a la Agencia Española de Protección de Datos en caso de no ver correctamente atendido el ejercicio de sus derechos.

No se comunicarán sus datos a otros terceros salvo a las administraciones públicas pertinentes y/o cuando sea obligatorio legal o normativamente.

Los datos serán conservados mientras sean compatibles con la finalidad con la que fueron recogidos, en cumplimiento de obligaciones legales de conservación y para hacer frente a las responsabilidades que pudieran derivarse del tratamiento, para después ser suprimidos. El participante podrá revocar su consentimiento, retirarse del estudio y solicitar la supresión de sus datos personales en cualquier momento comunicándoselo al investigador principal.

Igualmente queda informado de que los resultados del presente proyecto podrán ser usados en el futuro en otros proyectos de investigación relacionados con el campo de estudio objeto del presente, así como que tiene derecho a ser informado sobre los resultados del estudio en el caso de que así lo solicite.

☐ SÍ DESEA CONOCER LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO.

Y, para que así conste, se firma el presente documento en,

Villanueva de Gállego, a **18/05/2026**

Firma paciente/participante	Firma investigador principal
DNI	DNI

Anexo 3. Procedimiento de evaluación del Central Activation Ratio (CAR)

El presente procedimiento ha sido elaborado a partir de protocolos previamente descritos en la literatura para la valoración de la activación voluntaria del cuádriceps mediante la técnica de superimposed burst durante una contracción voluntaria máxima isométrica (MVIC) [17,43,44].

1. Objetivo

El objetivo de esta prueba será cuantificar la activación voluntaria del cuádriceps mediante el Central Activation Ratio (CAR), considerado la variable principal del estudio. Esta medición permitirá valorar la presencia de inhibición muscular artrogénica del cuádriceps tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior.

2. Material necesario

- Dinamómetro isocinético (Biodex)
- Estimulador eléctrico.
- Electrodos de estimulación.
- Sistema de registro del torque.
- Cinchas de estabilización.
- Hoja de recogida de datos.

3. Posición del participante

El participante se colocará sentado en el dinamómetro, con el tronco, la pelvis y el muslo estabilizados mediante cinchas. El eje del dinamómetro se alineará con el eje articular de la rodilla.

La rodilla evaluada se colocará en una posición estandarizada de flexión, preferentemente a 60º, y dicha posición se mantendrá constante en todas las evaluaciones.

4. Familiarización

Antes de la prueba, el participante realizará una fase de familiarización que incluirá contracciones submáximas y una explicación de la estimulación eléctrica. El objetivo será asegurar la comprensión de la tarea y reducir el efecto de aprendizaje.

5. Procedimiento

El participante realizará contracciones voluntarias máximas isométricas (MVCI) de extensión de rodilla.

Se realizarán un mínimo de tres contracciones máximas voluntarias, con descanso suficiente entre intentos para limitar la fatiga. Durante la fase estable de la contracción máxima, se aplicará una estimulación eléctrica supramáxima superpuesta al cuádriceps.

La prueba se considerará válida si el participante realiza un esfuerzo máximo, mantiene la contracción durante el tiempo indicado y no presenta dolor intenso, compensaciones importantes o interrupción voluntaria del esfuerzo.

6. Cálculo del CAR

El CAR se calculará mediante la siguiente fórmula:

CAR = [MVIC / (MVIC + torque producido por la estimulación superpuesta)] × 100

Donde MVIC corresponde al torque máximo producido durante la contracción voluntaria máxima isométrica.

Un valor más cercano al 100% indicará una mayor activación voluntaria del cuádriceps. Valores más bajos indicarán un mayor déficit de activación voluntaria, compatible con la presencia de inhibición muscular artrogénica (AMI).

7. Registro de datos

Para cada participante se registrarán:

- código del participante;
- grupo asignado;
- momento de evaluación: T0, T1 o T2;
- miembro evaluado;
- torque máximo voluntario;
- torque adicional producido por la estimulación superpuesta;
- valor del CAR;
- dolor durante la prueba;
- observaciones del evaluador.

El valor final del CAR corresponderá a la media de los intentos válidos.

8. Momentos de evaluación

La evaluación del CAR se realizará en los siguientes momentos:

- T0: evaluación inicial antes de empezar la intervención.
- T1: evaluación intermedia a las 6 semanas.
- T2: evaluación final al terminar las 12 semanas de intervención.

9. Seguridad

La prueba será interrumpida en caso de dolor intenso, aumento importante de la sintomatología, sensación de inestabilidad, mareo, malestar, intolerancia a la estimulación eléctrica o rechazo del participante a continuar.

Siempre que sea posible, la evaluación será realizada por el mismo evaluador, cegado a la asignación de los grupos.

Anexo 4. Procedimiento de evaluación de la fuerza del cuádriceps mediante BIODEX

El presente procedimiento ha sido elaborado a partir de protocolos previamente descritos en la literatura y de procedimientos clínicos utilizados en la valoración isocinética de la rodilla tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior.

1. Objetivo

La fuerza muscular del cuádriceps será evaluada mediante dinamometría isocinética con Biodex, con el objetivo de cuantificar la capacidad del participante para producir un momento de fuerza máximo durante movimientos controlados de extensión y flexión de rodilla. La evaluación permitirá analizar la fuerza concéntrica máxima (60°/s) del cuádriceps y de los isquiotibiales, la producción de fuerza a mayor velocidad (potencia : 240°/s), la fuerza excéntrica (30°/s) y la simetría entre el miembro reconstruido y el miembro sano (LSI).

En el contexto de la reconstrucción del ligamento cruzado anterior y de la inhibición muscular artrogénica, esta evaluación resulta especialmente relevante, ya que un déficit de fuerza del cuádriceps puede reflejar tanto pérdida de capacidad muscular periférica como una activación voluntaria incompleta del músculo. La dinamometría isocinética permite estandarizar la velocidad angular, el rango de movimiento, la posición del paciente y el modo de contracción, lo que mejora la reproducibilidad de la medición.

La evaluación isocinética de rodilla se utiliza frecuentemente después de reconstrucción del LCA para cuantificar el peak torque, los déficits de fuerza y las asimetrías entre miembros. Además, el criterio de simetría ≥90% se emplea con frecuencia en baterías de retorno al deporte, aunque no debe interpretarse como criterio único de alta deportiva.

La variable principal de fuerza será el peak torque (momento de fuerza máxima) concéntrico del cuádriceps a 60°/s normalizado al peso corporal. De forma complementaria, se registrará el rendimiento a 240°/s, la fuerza excéntrica a 30°/s, el déficit bilateral, el ratio isquiotibiales/cuádriceps y el ángulo de aparición del peak torque. Registrados en la tabla 5.

Preparación del participante

Antes de realizar la prueba, se comprobará que el participante no presenta dolor intenso, derrame significativo, limitación articular importante o cualquier condición que impida realizar contracciones máximas de forma segura. El participante recibirá una explicación del procedimiento y realizará una familiarización previa para reducir el efecto de aprendizaje.

El calentamiento consistirá en 5 minutos de bicicleta estática a intensidad ligera-moderada. A continuación, el participante realizará una fase de activación progresiva del cuádriceps en una máquina de extensión de rodilla, con el objetivo de preparar al músculo para la producción máxima de fuerza durante la evaluación isocinética, sin generar fatiga previa.

En esta fase, el participante realizará hasta 3 series de 6 repeticiones submáximas, aumentando progresivamente la carga en cada serie. La consigna será realizar una subida progresiva de la carga, buscando sentir la contracción del cuádriceps y mejorar la conexión con el músculo, pero sin llegar a una sensación de fatiga. El objetivo no será fatigar al participante, sino preparar el sistema neuromuscular para que pueda rendir al máximo durante el test de fuerza en el Biodex.

Entre cada serie se dejarán 2 minutos de recuperación. Si durante una serie aparece sensación de fatiga o pérdida de calidad en la ejecución, el participante deberá detener la serie antes de completar las 6 repeticiones, descansar 2 minutos y continuar con una carga superior en la siguiente serie.

Por ejemplo, el participante podrá realizar 6 repeticiones en la primera serie, 4 repeticiones en la segunda serie y 2 repeticiones en la tercera serie, siendo esta última carga cercana a la fuerza máxima que deberá producir posteriormente durante la prueba isocinética.

Tras finalizar la última serie de activación, se dejarán entre 4 y 6 minutos de recuperación antes de iniciar el test en el Biodex, con el objetivo de limitar la fatiga y favorecer el efecto de potenciación post-activación, permitiendo así que el participante pueda producir el máximo nivel de fuerza durante la evaluación.

Colocación del participante

El participante se colocará sentado en el dinamómetro Biodex, con la espalda apoyada en el respaldo y la cadera flexionada aproximadamente a 90°. El tronco, la pelvis y el muslo evaluado serán estabilizados mediante cinchas para limitar movimientos compensatorios.

El eje mecánico del dinamómetro se alineará con el eje articular de la rodilla, tomando como referencia el epicóndilo lateral del fémur. El brazo del dinamómetro se fijará en el tercio distal de la pierna, por encima de la articulación del tobillo. Se comprobará que la distancia de fijación sea la misma en ambos miembros para asegurar la comparabilidad entre la pierna sana y la pierna operada.

Se dejará una pequeña separación entre la fosa poplítea y el borde del asiento para evitar molestias y permitir un movimiento libre de flexo-extensión de rodilla. La amplitud de movimiento se ajustará aproximadamente desde 90° de flexión de rodilla hasta la extensión casi completa.

Calibración y corrección gravitatoria

Antes de iniciar la evaluación, se configurará la posición inicial del dinamómetro a 90° de flexión de rodilla. Posteriormente, se realizará la corrección gravitatoria del peso del miembro inferior a 30°.
Para ello, se colocará la pierna del participante en la posición indicada, se le pedirá que relaje completamente el miembro y se registrará el peso del segmento. Este procedimiento se repetirá si es necesario para asegurar que el participante no realiza contracción muscular durante la medición. La corrección gravitatoria será realizada de forma independiente para cada miembro.

En la evaluación del miembro patológico se utilizará la opción de "espejo de amplitudes" para mantener el mismo rango de movimiento que en el miembro sano, repitiendo únicamente la medición del peso del miembro.

Orden de evaluación
La evaluación se realizará primero en el miembro sano y posteriormente en el miembro reconstruido. Este orden permite obtener una referencia inicial del rendimiento del miembro no lesionado.

En todos los momentos de evaluación del estudio, el orden de prueba será el mismo para cada participante. Se registrará cualquier incidencia durante la prueba, como dolor, fatiga, sensación de inseguridad, compensaciones visibles o incapacidad para realizar un esfuerzo máximo.

Protocolo de prueba

Antes de iniciar la prueba, el paciente tendrá entre 4 y 6 minutos para disfrutar de la ventana del potencial post-activación.
Entre cada serie se dejarán entre 4 y 6 minutos de recuperación, con el objetivo de limitar el efecto de la fatiga y permitir una recuperación suficiente de los sustratos energéticos, especialmente del sistema ATP-fosfocreatina, antes del siguiente esfuerzo máximo.

Evaluación concéntrica

Serie	Modo	Velocidad	Repeticiones	Objetivo
Serie 1	Concéntrico/concentrico	60°/s	3 repeticiones máximas	Fuerza máxima
Serie 2	Concéntrico/concentrico	240°/s	6 repeticiones máximas	Producción de fuerza a alta velocidad / potencia

Durante la prueba concéntrica, el participante realizará movimientos máximos de extensión y flexión de rodilla durante todo el recorrido articular disponible. La velocidad de 60°/s permitirá

valorar principalmente la fuerza máxima, mientras que la velocidad de 240°/s aportará información complementaria sobre la producción de fuerza a mayor velocidad (potencia).

Evaluación excéntrica

Serie	Modo	Velocidad	Repeticiones	Objetivo
Serie 1	Excéntrico cuádriceps	60°/s – 30°/s	3 repeticiones máximas	Fuerza excéntrica del cuádriceps
Serie 2	Excéntrico isquiotibiales	30°/s – 60°/s	3 repeticiones máximas	Fuerza excéntrica de los isquiotibiales

La evaluación excéntrica permitirá analizar la capacidad del cuádriceps y de los isquiotibiales para producir fuerza durante contracciones de frenado o control del movimiento. Esta información es relevante en deportistas tras reconstrucción del LCA, ya que las tareas de desaceleración, aterrizaje y cambio de dirección requieren una adecuada capacidad de control excéntrico.

Consignas estandarizadas durante la prueba

Antes de la prueba, el evaluador explicará el movimiento y realizará una demostración si es necesario. La consigna principal será:

"Empuja y tira lo más fuerte posible durante todo el recorrido."

Durante la ejecución, se proporcionará estímulo verbal intenso y estandarizado para favorecer el esfuerzo máximo. Se animará al participante durante cada repetición, manteniendo el mismo tipo de instrucciones en ambos miembros y en todos los momentos de evaluación.

Criterios de validez de la prueba

Una repetición será considerada válida si el participante realiza el movimiento completo, sin interrupción, sin dolor limitante y sin compensaciones importantes del tronco o la pelvis. Se controlará que el participante no se ayude con los brazos ni modifique su posición durante la prueba.

La prueba podrá repetirse si se observa una mala comprensión de la consigna, una contracción claramente submáxima, una pérdida de alineación del eje o una interrupción del movimiento.

Cálculo del Limb Symmetry Index

El índice de simetría entre miembros inferiores será calculado mediante la siguiente fórmula:

LSI = (valor del miembro operado / valor del miembro sano) × 100

La interpretación general será la siguiente:

Resultado	Interpretación
LSI ≥ 90%	Simetría generalmente considerada satisfactoria para criterios de retorno al deporte
LSI 85–89%	Déficit leve, aceptable en algunos criterios clínicos pero no óptimo para deportes de pivote
LSI 80–84%	Déficit moderado
LSI <80%	Déficit importante

Según la literatura actual, para deportes de pivote se necesita un déficit < 15% para el retorno al deporte.

Interpretación clínica en contexto LCA/AMI

Un déficit de peak torque del cuádriceps en el miembro reconstruido será interpretado como una disminución de la capacidad de producción de fuerza. En el contexto de la AMI, este déficit no será considerado únicamente como consecuencia de atrofia muscular, sino también como posible expresión de una alteración de la activación voluntaria del cuádriceps.

Por este motivo, los resultados del Biodex se interpretarán de forma complementaria a la evaluación del Central Activation Ratio. El CAR permitirá estimar la capacidad de activación voluntaria, mientras que el Biodex permitirá cuantificar la producción mecánica de fuerza. Una mejora del CAR acompañada de una mejora del peak torque sugeriría una recuperación más completa de la función neuromuscular del cuádriceps.

Análisis del ángulo de peak torque

Una diferencia elevada entre miembros podría sugerir una alteración en la capacidad de producir fuerza en determinados rangos articulares. De forma clínica, se considerará relevante observar diferencias cercanas o superiores a 15° entre ambos miembros, aunque este valor será interpretado con prudencia y como criterio complementario, no como criterio diagnóstico aislado. La literatura reciente insiste en que el análisis del peak torque aislado puede no ser suficiente, ya que pueden persistir déficits de fuerza en rangos articulares concretos aunque el valor máximo global parezca simétrico. Por ello, el análisis ángulo-específico puede aportar información adicional tras reconstrucción del LCA.

Según la literatura sobre dinamometría isocinética, el peak torque del cuádriceps durante la extensión de rodilla suele aparecer alrededor de rangos medios de flexión, aproximadamente cerca de 60–70°, aunque puede variar según el modo de contracción, la velocidad, el sujeto y el protocolo utilizado.

Ventajas del uso del Biodex

Ventaja	Interés para el estudio
Control de la velocidad angular	Permite comparar la fuerza a velocidades específicas
Control del rango articular	Permite estandarizar la amplitud de movimiento
Medición bilateral	Permite calcular déficits y LSI
Reproducibilidad	Facilita comparaciones entre T0, T1 y T2
Seguridad	Sistema aservido fuerza-velocidad
Feedback visual	Puede mejorar la comprensión y la implicación del participante
Registro de múltiples variables	Peak torque, trabajo, potencia, ratio H/Q, ángulo de peak torque
Curvas del rango de movimiento por la fuerza producida	Conocer los angulos con deficit de produccion de fuerza

Limitaciones del test

Limitación	Implicación
Trabajo en cadena cinética abierta	No reproduce completamente las demandas funcionales del deporte
Baja especificidad deportiva	No reproduce gestos como saltos, aterrizajes, cambios de dirección o desaceleraciones
Dificultad de interpretación	Los valores normales varían según edad, sexo, deporte, nivel competitivo y momento postoperatorio
Influencia del aprendizaje	Puede requerir familiarización previa
Influencia del dolor o aprensión	Puede limitar la producción máxima de fuerza
Peak torque aislado	Puede ocultar déficits en rangos articulares específicos

Por esta razón, los resultados del Biodex no serán interpretados de forma aislada, sino en combinación con el CAR, los test funcionales, la calidad del movimiento y la escala ACL-RSI.

Tabla de variables isocinéticas registradas

Nom : Prénom : Poids :

ANALYSE TEST ISOCINETIQUE CERS		Concentrique 60°/s					Concentrique 240°/s					Excentrique 30°/s				
		Moment max (N.m)	Valeurs attendues	Moment max/poids (%)	Valeur attendue	Diff Sain/Opéré	Moment max (N.m)	Valeurs attendues	Moment max/poids (%)	Valeurs attendues	Diff Sain/Opéré	Moment max (N.m)	Valeurs attendues	Moment max/poids (%)	Valeurs attendues	Diff Sain/opéré
Extension	Sain	221	0		300%	5,4%	126	0		230%	1,6%	228	0			-15,4%
	Opérée	209					124					263				
Flexion	Sain	124	0		200%	2,4%	90	0		180%	4,4%	172	0			14,0%
	Opérée	121					86					148				
												Ratio mixte (Ijexc30/Qconc240)				
Ratio IJ/Q	Sain	0,56					0,71					1,37				
	Opérée	0,58					0,69					1,19				
		Autour de 0,66					Autour de 0,8					Autour de 1,2				

Tabla 5 : Variables Isocinéticas registradas (CERS de Capbreton)

Siempre que sea posible, las evaluaciones serán realizadas por el mismo evaluador, cegado a la asignación de los grupos.

Anexo 5. Procedimiento de evaluación funcional: Y-Balance Test, Lateral Step-Down Test y Single-Leg Squat

El presente procedimiento ha sido elaborado a partir de protocolos previamente descritos en la literatura para la valoración funcional del miembro inferior. El Y-Balance Test permite evaluar la estabilidad dinámica mediante alcances en tres direcciones y el cálculo de una puntuación compuesta normalizada por la longitud del miembro inferior. El Single-Leg Squat y el Lateral Step-Down Test permiten valorar de forma clínica la calidad del movimiento, especialmente el valgo dinámico de rodilla, el control pélvico y la estabilidad del tronco.

1. Objetivo

El objetivo de esta evaluación será analizar el control neuromuscular, la estabilidad dinámica y la calidad del movimiento del miembro inferior mediante tres pruebas funcionales:

- Y-Balance Test.
- Single-Leg Squat.
- Lateral Step-Down Test.

Estas pruebas serán consideradas variables secundarias del estudio y permitirán complementar la evaluación de la activación voluntaria y de la fuerza del cuádriceps.

Y-Balance Test

Objetivo de la prueba

El Y-Balance Test se utilizará para evaluar la estabilidad dinámica del miembro inferior en apoyo unipodal. La prueba consiste en mantener el equilibrio sobre una pierna mientras el participante alcanza la máxima distancia posible con el miembro contralateral en tres direcciones: anterior, posteromedial y posterolateral.

Esta prueba permite valorar el control postural dinámico, la estabilidad del miembro inferior y la presencia de asimetrías funcionales entre ambos miembros. En el contexto de la reconstrucción del LCA, aporta información complementaria sobre el rendimiento funcional durante una tarea dinámica en apoyo unipodal.

Material necesario

Se utilizará un dispositivo específico de Y-Balance Test o, en su defecto, un sistema de medición con cinta adhesiva colocada en el suelo en las tres direcciones de alcance. También se utilizará una cinta métrica para registrar la distancia alcanzada en centímetros y una hoja de registro para anotar los resultados.

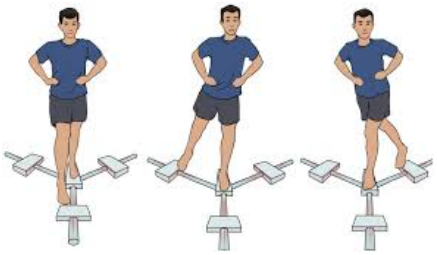
La prueba se realizará en una superficie estable, regular y no deslizante, en un entorno controlado, para mejorar la reproducibilidad de las mediciones entre los diferentes momentos de evaluación.

Preparación del participante

El participante realizará la prueba descalzo. Antes de comenzar, se medirá la longitud de ambos miembros inferiores desde la espina ilíaca anterosuperior hasta el maléolo medial, con el objetivo de normalizar posteriormente las distancias obtenidas.

Antes del registro oficial, el participante recibirá una explicación verbal y una demostración de la prueba.

Posición inicial y procedimiento



El participante se colocará en apoyo unipodal, con el pie de apoyo situado en el centro del sistema de medición y las manos apoyadas sobre las caderas. La pierna que permanece en apoyo será considerada la pierna evaluada.

Con la pierna contralateral, deberá alcanzar la mayor distancia posible en la dirección indicada, tocar ligeramente el punto más distal alcanzado con los dedos del pie y volver de forma controlada a la posición inicial.

Se evaluarán tres direcciones:

- Anterior : Alcance hacia delante
- Posteromedial : Alcance hacia atrás y hacia medial
- Posterolateral : Alcance hacia atrás y hacia lateral

Para cada dirección y cada miembro, se realizarán tres intentos válidos. La distancia final utilizada para el análisis será la media de los tres intentos válidos.

Criterios de intento inválido

Un intento será considerado inválido si el participante:

- Toca el suelo con el pie libre para mantener el equilibrio
- Apoya excesivamente el pie libre sobre la cinta o el indicador
- Pierde el equilibrio durante el intento
- No consigue volver a la posición inicial
- Mueve, levanta o desplaza el pie de apoyo
- Se detiene a mitad del recorrido

- Golpea o lanza el indicador en lugar de tocarlo de forma controlada

En caso de intento inválido, se repetirá la medición hasta obtener tres intentos válidos para esa dirección.

Fórmulas de cálculo

Distancia absoluta

Distancia absoluta = (intento 1 + intento 2 + intento 3) / 3

Distancia normalizada

Distancia normalizada = (distancia absoluta / longitud del miembro inferior) × 100

Puntuación compuesta

Puntuación compuesta = [(ANT + PM + PL) / (3 × longitud del miembro inferior)] × 100

Asimetría anterior

Asimetría anterior = distancia anterior del miembro sano – distancia anterior del miembro operado

Limb Symmetry Index

LSI = (valor del miembro operado / valor del miembro sano) × 100

Interpretación de los resultados

Una mayor distancia de alcance normalizada y una mayor puntuación compuesta indicarán mejor estabilidad dinámica del miembro inferior. Por el contrario, una menor distancia podrá reflejar un déficit de control postural, fuerza, movilidad, estabilidad o confianza en el miembro evaluado.

De forma orientativa, se prestará especial atención a:

Resultado	Interpretación
LSI ≥90%	Simetría funcional generalmente satisfactoria
LSI <90%	Asimetría funcional relevante
Asimetría anterior >4 cm	Posible indicador de déficit funcional o mayor riesgo de lesión en determinadas poblaciones deportivas
Puntuación compuesta baja	Posible déficit de estabilidad dinámica global

Estos valores no se interpretarán como puntos de corte universales, ya que el rendimiento en el Y-Balance Test puede variar según el deporte, el sexo, la edad, el nivel competitivo y el momento de la rehabilitación.

Interpretación en contexto LCA y AMI

En pacientes tras reconstrucción del LCA, el Y-Balance Test permite valorar la estabilidad dinámica y la simetría funcional entre miembros. La dirección anterior presenta especial interés clínico, ya que exige control de la flexión de rodilla, fuerza del cuádriceps, movilidad de tobillo y estabilidad del miembro inferior en apoyo.

Una asimetría persistente, especialmente en la dirección anterior, puede reflejar déficits funcionales incluso en pacientes que han sido autorizados para el retorno al deporte. En el contexto de la inhibición muscular artrogénica, una activación incompleta del cuádriceps podría limitar el control de la rodilla durante el apoyo unipodal y reducir la distancia de alcance.

Sin embargo, el Y-Balance Test no permite diagnosticar la AMI ni identificar por sí solo la causa exacta del déficit. Por ello, sus resultados serán interpretados de forma complementaria junto con la fuerza isocinética, el Central Activation Ratio, el Lateral Step-Down Test, el Single-Leg Squat y la escala ACL-RSI.

Lateral Step-Down Test

Objetivo de la prueba

El Lateral Step-Down Test será utilizado para evaluar la calidad del movimiento del miembro inferior durante una tarea funcional de descenso unipodal desde un step. Esta prueba permite observar el control dinámico de la rodilla, la estabilidad pélvica, la alineación del miembro inferior, el control del tronco y la capacidad del participante para mantener una postura estable durante una tarea de carga unilateral.

En el contexto de la reconstrucción del LCA, esta prueba resulta especialmente útil para identificar compensaciones funcionales que pueden persistir durante la rehabilitación, como el valgo dinámico de rodilla, la caída pélvica, la inclinación del tronco o la falta de control excéntrico durante el descenso.

Material necesario

Para la realización de la prueba se utilizará un step con una superficie estable y no deslizante, y una cámara de vídeo colocada en el plano frontal. Cuando sea necesario, se podrá añadir una segunda grabación en el plano sagital para complementar el análisis del movimiento.

El análisis principal se realizará mediante observación clínica directa y registro en vídeo. El programa Kinovea permitirá complementar la valoración cualitativa mediante la comparación estandarizada de la alineación del miembro inferior entre los distintos momentos de evaluación.

Preparación del participante

El participante realizará la prueba con ropa cómoda que permita observar la posición del tronco, pelvis, rodilla, tobillo y pie. Antes de iniciar la medición, recibirá una explicación verbal del procedimiento y una demostración de la tarea.

Posición inicial



El participante se colocará de pie sobre el step, en apoyo unipodal sobre el miembro evaluado. El pie del miembro evaluado se colocará cerca del borde del step, manteniendo una posición estable. Las manos permanecerán apoyadas sobre las caderas durante toda la prueba.

El miembro contralateral quedará suspendido en el aire, ligeramente por delante o al lado del step, sin apoyar el peso corporal sobre él. El participante deberá mantener la mirada al frente y evitar utilizar los brazos para recuperar el equilibrio.

Procedimiento de ejecución

Desde la posición inicial, el participante realizará un descenso controlado flexionando la rodilla del miembro de apoyo hasta tocar suavemente el suelo con el talón del miembro contralateral. Después, volverá a la posición inicial mediante extensión de la rodilla y la cadera del miembro evaluado.

La consigna será: "Baja de forma lenta y controlada hasta tocar suavemente el suelo con el talón, sin descargar peso sobre esa pierna, y vuelve después a la posición inicial manteniendo el equilibrio."

Se realizarán 5 repeticiones por cada miembro. La ejecución deberá ser controlada, evitando movimientos bruscos o pérdida de estabilidad. La calidad del movimiento será evaluada durante las repeticiones registradas.

Criterios observados

Durante la prueba se observarán los siguientes elementos:

Elemento observado	Interpretación clínica
Uso de los brazos	Estrategia compensatoria para mantener el equilibrio
Inclinación del tronco	Compensación proximal o déficit de control lumbopélvico
Posición de la pelvis	Control pélvico y estabilidad de cadera
Alineación de la rodilla	Presencia de valgo dinámico o mala alineación frontal
Estabilidad del pie de apoyo	Control distal y estabilidad general
Pérdida de equilibrio	Alteración del control postural durante la tarea

Sistema de puntuación

Se utilizará una escala ordinal basada en criterios clínicos observacionales. Una puntuación más alta indicará una peor calidad del movimiento.

Criterios	Errores observadas	Puntuación
Brazos	Las manos se separan de la cintura o se utilizan para equilibrarse	+1
Tronco	Inclinación del tronco en cualquier plano	+1
Pelvis	Pérdida de la horizontalidad pélvica	+1
Rodilla	La tuberosidad tibial se alinea medial al segundo dedo	+1
Rodilla marcada	La tuberosidad tibial se desplaza medial al borde medial del pie	+2
Estabilidad	Apoyo contralateral, vacilación o pérdida de equilibrio	+1

La puntuación total permitirá clasificar la calidad del movimiento:

Puntuación total	Interpretación
0–1	Buena calidad de movimiento
2–3	Calidad de movimiento moderada
≥4	Mala calidad de movimiento

Table 1. Lateral step down test scoring criteria.

Movement Deviation	Interpretation	Score
Arm Strategy	Removal of a hand from the wait	1
Trunk Alignment	Leaning in any direction	1
Pelvic Plane	Loss of horizontal plane	1
Knee Position	Tibial tuberosity medial to second toe	1
	Tibial tuberosity medial to medial border of foot	2
Steady Stance	Stepping down on contralateral limb or foot wavering	1
Cumulative Score		
0 or 1	Good	
2 or 3	Fair	
4 or above	Poor	

Tabla 6 : Lateral Step Down Test Scoring (Moderate reliability of the lateral step down test amongst experienced and novice physical therapists, Cody Mansfield PT y al. 2022)

Esta clasificación permite una valoración clínica sencilla de la calidad del movimiento durante el Lateral Step-Down Test. No obstante, la interpretación deberá realizarse con prudencia, ya que la fiabilidad puede variar según la experiencia del evaluador y la población evaluada.

Análisis mediante vídeo y Kinovea

El análisis mediante Kinovea se utilizará como complemento de la observación clínica. La cámara se colocará principalmente en el plano frontal, centrada sobre el participante, para observar la alineación del miembro inferior durante la fase de descenso.

Cuando sea posible, se analizarán los siguientes aspectos:

Variable observada	Utilidad clínica
Alineación rodilla-pie	Identificación del valgo dinámico
Desplazamiento medial de la rodilla	Control frontal de rodilla
Inclinación del tronco	Compensaciones proximales
Caída pélvica	Control lumbopélvico y función de la cadera
Profundidad de flexión de rodilla	Control excéntrico del cuádriceps
Estabilidad del apoyo	Control postural durante la tarea

El objetivo del análisis mediante vídeo no será sustituir la valoración clínica, sino mejorar la estandarización del seguimiento entre T0, T1 y T2. Este registro permitirá comparar la evolución del participante a lo largo del estudio y observar si la intervención se acompaña de una mejora en la calidad del movimiento.

Interpretación en contexto LCA y AMI

En pacientes tras reconstrucción del LCA, una mala calidad de movimiento durante el Lateral Step-Down Test puede reflejar déficits persistentes de control neuromuscular. La presencia de valgo dinámico, caída pélvica, inclinación del tronco o pérdida de estabilidad puede estar relacionada con déficit de fuerza del cuádriceps, alteraciones del control de cadera, déficit de dorsiflexión de tobillo o estrategias de protección del miembro reconstruido.

En el contexto de la AMI, el Lateral Step-Down Test no permite diagnosticar directamente la inhibición muscular artrogénica, pero puede mostrar sus consecuencias funcionales. Una activación incompleta del cuádriceps puede dificultar el control excéntrico de la flexión de rodilla durante el descenso y favorecer compensaciones proximales, como aumento de la inclinación del tronco, caída pélvica o alteraciones en la alineación de la rodilla.

Por este motivo, los resultados del Lateral Step-Down Test serán interpretados de forma complementaria junto con el CAR, la fuerza isocinética del cuádriceps, el Y-Balance Test, el Single-Leg Squat y la escala ACL-RSI.

Single-Leg Squat

Objetivo de la prueba

El Single-Leg Squat será utilizado para evaluar la calidad del movimiento del miembro inferior durante una tarea funcional de sentadilla unipodal. Esta prueba permite observar el control dinámico de la rodilla, la estabilidad pélvica, el control del tronco, la alineación del miembro inferior, la estabilidad del pie y la presencia de compensaciones durante una tarea de carga unilateral.

En el contexto de la reconstrucción del LCA, esta prueba resulta especialmente útil para identificar alteraciones del control neuromuscular que pueden persistir durante la rehabilitación, como el valgo dinámico de rodilla, la caída pélvica, la inclinación del tronco, la pérdida de equilibrio o la reducción de la profundidad de flexión de rodilla.

Material necesario

Para la realización de la prueba se utilizará una superficie estable y no deslizante, una cámara de vídeo colocada en el plano frontal y, cuando sea posible, una segunda grabación en el plano sagital. El análisis principal se realizará mediante observación clínica directa y registro en vídeo.

El programa Kinovea permitirá complementar la valoración cualitativa mediante la comparación estandarizada de la alineación del miembro inferior entre los diferentes momentos de evaluación.

Preparación del participante

El participante realizará la prueba con ropa cómoda que permita observar la posición del tronco, pelvis, cadera, rodilla, tobillo y pie. Antes de iniciar la medición, recibirá una explicación verbal del procedimiento y una demostración de la tarea.

Posición inicial



El participante se colocará de pie en apoyo unipodal sobre el miembro evaluado, con las manos apoyadas sobre las caderas. El miembro contralateral permanecerá elevado, sin contactar con el suelo durante la ejecución.

El participante deberá mantener la mirada al frente y evitar utilizar los brazos para recuperar el equilibrio. La pierna de apoyo será considerada la pierna evaluada.

Procedimiento de ejecución

Desde la posición inicial, el participante realizará una sentadilla unipodal de forma lenta y controlada, flexionando la rodilla del miembro de apoyo hasta alcanzar aproximadamente 45° de flexión de rodilla, o hasta la máxima profundidad posible sin pérdida de control. Posteriormente, volverá a la posición inicial mediante extensión de rodilla y cadera.

La consigna será: "Flexiona la rodilla como si quisieras sentarte, manteniendo el equilibrio y la rodilla alineada, y vuelve después a la posición inicial de forma controlada."

Se realizarán 5 repeticiones por cada miembro. La ejecución deberá ser controlada, evitando movimientos bruscos, la pérdida de equilibrio o compensaciones excesivas. La calidad del movimiento será evaluada durante las repeticiones registradas.

Criterios observados

Durante la prueba se observarán los siguientes elementos:

Elemento observado	Interpretación clínica
Control del tronco	Inclinación, rotación o compensación proximal
Posición de la pelvis	Caída pélvica, rotación o pérdida de horizontalidad
Control de cadera	Adducción o rotación interna excesiva
Alineación de la rodilla	Presencia de valgo dinámico o mala alineación frontal
Estabilidad del pie	Prono-supinación excesiva, pérdida del apoyo o inestabilidad
Profundidad de flexión	Capacidad para controlar el descenso
Equilibrio	Pérdida de estabilidad o contacto del pie libre con el suelo
Calidad global	Fluidez, control y ausencia de compensaciones

Sistema de puntuación

Se utilizará una escala cualitativa ordinal basada en criterios clínicos observacionales. Una puntuación más alta indicará una peor calidad del movimiento y mayor presencia de compensaciones funcionales.

Segmento	Criterio de alteración	Puntuación
Brazos	Utilización de los brazos para equilibrarse	0/1
Tronco	Inclinación o rotación excesiva	0/1
Pelvis	Caída pélvica, rotación o pérdida de horizontalidad	0/1
Cadera	Adducción o rotación interna excesiva	0/1
Rodilla	Valgo dinámico o desplazamiento medial de la rodilla	0/1

Tobillo-pie	Pronosupinación excesiva, pérdida de apoyo o inestabilidad	0/1
Profundidad	Incapacidad para alcanzar la flexión prevista sin compensar	0/1
Equilibrio	Pérdida de equilibrio o contacto del pie libre con el suelo	0/1

La puntuación total permitirá clasificar la calidad del movimiento:

Puntuación total	**Interpretación**
0–1	Buena calidad de movimiento
2–3	Alteración ligera a moderada
≥4	Alteración importante del control neuromuscular

Esta clasificación permitirá realizar una valoración clínica sencilla de la calidad del movimiento durante la sentadilla unipodal. No obstante, la interpretación deberá realizarse con prudencia, ya que la fiabilidad puede variar según la experiencia del evaluador, la claridad de los criterios utilizados y la población evaluada.

Análisis mediante vídeo y Kinovea

El análisis mediante Kinovea se utilizará como complemento de la observación clínica. La cámara se colocará principalmente en el plano frontal, centrada sobre el participante, para observar la alineación del miembro inferior durante la fase de descenso y ascenso. Cuando sea posible, se añadirá una grabación en el plano sagital para valorar la profundidad de flexión de rodilla y las compensaciones del tronco.

Cuando sea posible, se analizarán los siguientes aspectos:

Variable observada	**Utilidad clínica**
Ángulo de proyección frontal de la rodilla	Identificación del valgo dinámico
Alineación cadera-rodilla-pie	Control global del miembro inferior
Inclinación del tronco	Compensaciones proximales
Caída pélvica	Control lumbopélvico y función de la cadera
Flexión máxima de rodilla	Profundidad funcional y control excéntrico
Estabilidad del pie	Control distal y estabilidad del apoyo
Fluidez del movimiento	Control motor global durante la tarea

El objetivo del análisis mediante vídeo no será sustituir la valoración clínica, sino mejorar la estandarización del seguimiento entre T0, T1 y T2. Este registro permitirá comparar la evolución del participante a lo largo del estudio y observar si la intervención se acompaña de una mejora en la calidad del movimiento.

Interpretación en contexto LCA y AMI

En pacientes tras reconstrucción del LCA, una mala calidad de movimiento durante el Single-Leg Squat puede reflejar déficits persistentes de control neuromuscular. La presencia de valgo dinámico, caída pélvica, inclinación del tronco, pérdida de equilibrio o menor profundidad de flexión de rodilla puede estar relacionada con déficit de fuerza del cuádriceps, alteraciones del control de cadera, déficit de movilidad de tobillo, falta de confianza en el miembro reconstruido o estrategias de protección.

En el contexto de la inhibición muscular artrogénica, el Single-Leg Squat no permite diagnosticar directamente la AMI, pero puede mostrar sus consecuencias funcionales. Una activación incompleta del cuádriceps puede limitar el control excéntrico de la flexión de rodilla durante la sentadilla unipodal, reducir la profundidad del movimiento y favorecer compensaciones proximales o distales.

Por este motivo, los resultados del Single-Leg Squat serán interpretados de forma complementaria junto con el CAR, la fuerza isocinética del cuádriceps, el Y-Balance Test, el Lateral Step-Down Test y la escala ACL-RSI.

Anexo 6. Cuestionario ACL-RSI

Nom du patient : ..... Date de naissance : ..../..../.....

Prénom : ..... Date de l'examen : ..../..../.....

ACL RSI (Anterior Cruciate Ligament – Return to Sport and Injury)

Instructions :

Merci de répondre aux questions suivantes concernant le sport principal que vous pratiquiez avant l'accident. Pour chaque question, cochez la case entre les deux extrêmes selon ce qui vous parait correspondre le mieux à la situation actuelle de votre genou.

1. Pensez-vous pouvoir pratiquer votre sport au même niveau qu'auparavant ?

Pas du tout sûr	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Totalement sûr

2. Pensez-vous que vous pourriez vous blesser de nouveau le genou si vous repreniez le sport ?

Extrêmement probable	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Pas du tout probable

3. Êtes-vous inquiet à l'idée de reprendre votre sport ?

Extrêmement inquiet	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Pas du tout inquiet

4. Pensez-vous que votre genou sera stable lors de votre pratique sportive ?

Pas du tout sûr	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Totalement sûr

5. Pensez-vous pouvoir pratiquer votre sport sans vous soucier de votre genou ?

Pas du tout sûr	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Totalement sûr

6. Etes-vous frustré de devoir tenir compte de votre genou lors de votre pratique sportive ?

Extrêmement frustré	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Pas du tout frustré

7. Craignez-vous de vous blesser de nouveau le genou lors de votre pratique sportive ?

Crainte extrême	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Aucune crainte

Translation, cross-cultural adaptation and validation of the French version of the Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) scale. Bohu Y, Klouche S, Lefevre N, Webster K, Herman S. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2015 Apr;23(4):1192-6. doi: 10.1007/s00167-014-2942-4.

1

http://fr.scale-library.com/pdf/Anterior_Cruciate_Ligament-Return_to_Sport_and_Injury_ACL_RSI.pdf

Nom du patient : . . . . . Date de naissance : . . . . / . . . . / . . . . . .

Prénom : . . . . . Date de l'examen : . . . . / . . . . / . . . . . .

8. Pensez-vous que votre genou peut résister aux contraintes ?

Pas du tout sûr	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Totalement sûr

9. Avez-vous peur de vous reblesser accidentellement le genou lors de votre pratique sportive ?

Très peur	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Pas du tout peur

10. Est-ce que l'idée de devoir éventuellement vous faire réopérer ou rééduquer vous empêche de pratiquer votre sport ?

Tout le temps	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	A aucun moment

11. Etes-vous confiant en votre capacité à bien pratiquer votre sport ?

Pas du tout confiant	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Totalement confiant

12. Vous sentez-vous détendu à l'idée de pratiquer votre sport ?

Pas du tout détendu	0 ☐	1 ☐	2 ☐	3 ☐	4 ☐	5 ☐	6 ☐	7 ☐	8 ☐	9 ☐	10 ☐	Totalement détendu

Score ACL-RSI (Total x 100) / 120 = ____ %

Translation, cross-cultural adaptation and validation of the French version of the Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) scale.
Bohu Y, Klouche S, Lefevre N, Webster K, Herman S. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2015 Apr;23(4):1192-6. doi: 10.1007/s00167-014-2942-4.

2

http://fr.scale-library.com/pdf/Anterior_Cruciate_Ligament-Return_to_Sport_and_Injury_ACL_RSI.pdf

Présentation

Objectif : Le retour au sport après une reconstruction du ligament croisé antérieur (LCA) nécessite une récupération physique et psychologique optimale. L'échelle Anterior Cruciate Ligament-Return-to-Sport after Injury (ACL-RSI) représente un outil intéressant pour évaluer cette dimension psychologique.

Description : Cette échelle comprend 12 items et a été élaborée à partir de 3 composantes corrélées au retour au sport : les émotions, la confiance dans sa performance et l'évaluation des risques. Chaque question est notée avec une échelle de notation numérique à 11 points où 0 correspond à la mention "pas du tout sûr" et 10 correspond à la mention "totalement sûr". Un score total est calculé de la manière suivante : Score ACL-RSI (Total x 100) / 120 = ...%

Interprétation : Un score élevé correspond à une réponse psychologique positive.

Matériel nécessaire : Aucun

Temps nécessaire : 5 à 10 minutes

Valeur clinique : L'ACL-RSI s'est avéré valide et fiable.
Après une reconstruction du LCA, le score psychologique ACL-RSI augmente progressivement en cours de suivi et est fortement et significativement lié au retour au sport.

Dans leur étude, Sadeqi et al. (2018) ont observés qu'un athlète de haut niveau qui a subi une reconstruction primaire sans complications postopératoires et avec un score ACL-RSI à 6 mois ≥ 60, est significativement plus susceptible de reprendre le même sport pré-lésionnel 2 ans après la chirurgie.

Bibliographie :
Bohu, Y., S. Klouche, N. Lefevre, K. Webster, et S. Herman. « Translation, Cross-Cultural Adaptation and Validation of the French Version of the Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) Scale ». Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA 23, no 4 (avril 2015): 1192-96. https://doi.org/10.1007/s00167-014-2942-4.

Sadeqi, Mansour, Shahnaz Klouche, Yoann Bohu, Serge Herman, Nicolas Lefevre, et Antoine Gerometta. « Progression of the Psychological ACL-RSI Score and Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Prospective 2-Year Follow-up Study From the French Prospective Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Cohort Study (FAST) ». Orthopaedic Journal of Sports Medicine 6, no 12 (17 décembre 2018). https://doi.org/10.1177/2325967118812819.

Slagers, Anton J., Inge H. F. Reininga, et Inge van den Akker-Scheek. « The Dutch Language Anterior Cruciate Ligament Return to Sport after Injury Scale (ACL-RSI) - Validity and Reliability ». Journal of Sports Sciences 35, no 4 (février 2017): 393-401. https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1167230.

Se utilizará la versión francesa validada del cuestionario ACL-RSI, teniendo en cuenta que el estudio se desarrollará en un centro ubicado en Francia.

Anexo 7. Protocolo multimodal específico dirigido a la reducción de la AMI

Principios generales

El protocolo comprenderá **3 sesiones principales por semana** y **1 sesión complementaria ligera a partir de la fase 2**.

Elemento	Decisión
Duración	12 semanas
Frecuencia	3 sesiones principales por semana
Sesión complementaria	1 sesión ligera por semana a partir de la semana 5
Duración de la sesión	Aproximadamente 60 minutos
Intensidad	Regulada mediante RIR, control de la velocidad de ejecución, calidad técnica y tolerancia clínica
Objetivo	Mejorar la activación voluntaria del cuádriceps, la fuerza controlada, la calidad del movimiento y la intención motora
Progresión	Criterion-based, con checkpoints en las semanas 4 y 8, utilizando RIR y, cuando esté disponible, VBT como herramientas de monitorización

Estructura tipo de una sesión principal

Bloque	Duración	Contenido	Objetivo
1. Activación neuromuscular	6 min	Extensión de rodilla con goma en bipedestación y ejercicios progresivos de control activo de la alineación de rodilla con resistencia elástica.	Preparar el cuádriceps para el trabajo principal, favorecer la conexión neuromuscular y mejorar la sensación de contracción antes de los ejercicios de fuerza
2. Imaginería motora	3-5 min	Visualización guiada de la contracción del cuádriceps y de los ejercicios principales de la sesión, según la fase del protocolo.	Facilitar la preparación cortical, la intención motora y la calidad de ejecución antes del trabajo de fuerza
3. HSR / trabajo excéntrico	35-45 min	Squat belt, squat belt con tempo lento, split squat o zancada posterior deslizada, leg extension, leg extension unilateral, leg curl y peso muerto rumano, según la sesión y la fase del protocolo.	Mejorar la fuerza del cuádriceps, la activación voluntaria y el control muscular bajo carga, utilizando tempos lentos y ejecución controlada
4. Control funcional	8-10 min	Step-down, single-leg squat, Y-Balance test y perturbaciones progresivas	Favorecer la transferencia hacia tareas funcionales, mejorar el control neuromuscular y trabajar la calidad del movimiento en condiciones de fatiga controlada
5. Feedback final	3-5 min	Registro del dolor, RPE, RIR, fatiga, calidad técnica y respuesta articular	Favorecer la autorregulación, el aprendizaje motor y la adaptación individual de la carga

La activación neuromuscular podrá integrarse durante las series de calentamiento de los ejercicios principales. De esta manera, se buscará una transferencia inmediata hacia el gesto de fuerza, mejorando la atención del participante sobre la contracción del cuádriceps y la calidad del movimiento.

Organización semanal general

Con el objetivo de controlar la fatiga y priorizar la calidad del movimiento, la semana se organizará en **tres sesiones principales**, diferenciando una sesión de fuerza controlada, una sesión de fuerza unilateral y una sesión más dinámica orientada a la transferencia funcional.

Sesión	Orientación principal	Contenido general
Sesión 1	Fuerza controlada y activación del cuádriceps	Activación neuromuscular, squat belt, leg curl y leg extension
Sesión 2	Fuerza unilateral y control del miembro inferior	Activación neuromuscular, squat belt, split squat o zancada posterior deslizada y leg extension
Sesión 3	Trabajo dinámico, cadena posterior y transferencia funcional	Activación neuromuscular, squat belt dinámico, zancadas dinámicas, step-up y peso muerto rumano o puente de glúteo

El protocolo incluirá un número limitado de ejercicios por sesión con el objetivo de priorizar la calidad técnica, la intención de contracción, la producción de fuerza y la ausencia de fatiga excesiva. La carga se ajustará mediante RIR, control de la velocidad de ejecución, dolor, calidad del movimiento y respuesta articular en las 24 horas posteriores.

Fase	Semanas	Objetivo principal	Contenido dominante
Fase 1	Semanas 1-4	Reactivación voluntaria y HSR ligero/moderado	Restaurar la intención de contracción, mejorar la calidad motora y favorecer la activación voluntaria del cuádriceps
Fase 2	Semanas 5-8	HSR / trabajo excéntrico y control neuromuscular	Aumentar la fuerza del cuádriceps, mejorar el control unipodal e introducir variabilidad y perturbaciones progresivas
Fase 3	Semanas 9-12	Alta carga controlada y transferencia funcional	Maximizar la fuerza controlada, mejorar la tolerancia a la carga y transferir progresivamente hacia desaceleraciones, recepciones y cambios de dirección

Progresión de la activación neuromuscular

La activación neuromuscular se realizará de forma progresiva a lo largo del protocolo.

Durante las semanas 1–4, se utilizará principalmente la extensión de rodilla con goma en bipedestación, con el objetivo de favorecer la contracción voluntaria del cuádriceps y mejorar la percepción del paciente sobre la extensión activa de rodilla sobre todo en los últimos grados de extensión.

Durante las semanas 5–8, se mantendrá la extensión de rodilla con goma en bipedestación y se añadirá la zancada con goma que induce el valgo dinámico de rodilla. En este ejercicio, la resistencia elástica inducirá una tendencia al desplazamiento medial de la rodilla, por lo que el participante deberá corregir activamente la alineación cadera-rodilla-pie durante la ejecución.

Durante las semanas 9–12, se mantendrán los ejercicios anteriores y se añadirá el single-leg squat con goma que induce el valgo dinámico de rodilla. Este ejercicio permitirá trabajar el control activo de la rodilla en una tarea unipodal más exigente, buscando que el participante mantenga una alineación adecuada del miembro inferior frente a una resistencia externa que induce el valgo.

Progresión de la imaginería motora

La imaginería motora se realizará antes del bloque principal de fuerza o de control funcional, con el objetivo de preparar al participante a nivel cortical, mejorar la intención motora y favorecer una ejecución más consciente del movimiento. El participante será guiado verbalmente para imaginar la contracción del cuádriceps, la alineación de la rodilla y la ejecución técnica del ejercicio principal antes de realizarlo.

Durante las semanas 1–4, la visualización se centrará principalmente en la contracción voluntaria del cuádriceps y en la correcta ejecución de ejercicios simples como la extensión de rodilla con goma en bipedestación, el leg extension y el squat belt. El objetivo será que el participante anticipe mentalmente la sensación de contracción del cuádriceps y el control de la extensión de rodilla.

Durante las semanas 5–8, la imaginería motora se aplicará antes de ejercicios de fuerza y control más exigentes, como el split squat, el step-up, la zancada con goma que induce una tendencia al valgo dinámico y el lateral step-down. En esta fase, la visualización incluirá la alineación cadera-rodilla-pie, el control de la pelvis y la corrección activa de la rodilla frente a una perturbación externa.

Durante las semanas 9–12, la visualización se orientará hacia ejercicios de mayor transferencia funcional, el single-leg squat con goma que induce una tendencia al valgo dinámico, el step-down, los aterrizajes controlados, las desaceleraciones progresivas y los cambios de dirección de baja a moderada intensidad. El objetivo será que el participante anticipe mentalmente la calidad del gesto, la estabilidad del miembro inferior y la activación del cuádriceps antes de tareas más próximas al retorno al deporte.

Squat Belt



Sesión 1. Fuerza controlada y activación del cuádriceps

Ejercicio	Series x repeticiones	RIR	Tempo	Descanso	Objetivo
Activación del cuádriceps con banda elástica	3 x 6-8	No aplica. Búsqueda de contracción voluntaria máxima, sensación muscular y conexión neuromuscular	Controlado	Durante las series de calentamiento del squat belt	Reclutamiento del cuádriceps y preparación neuromuscular
Imaginería motora del cuádriceps	3-5 min	—	—	—	Preparación cortical e intención motora
Squat belt	2 x 8-12	2	2-1-2	2 min	Fuerza controlada del cuádriceps
Squat belt con tempo lento	1 x 6	1-2	6-0-3	3 min	Control del cuádriceps y trabajo HSR
Leg curl	3 x 8-12	2-3	2-1-4	2 min	Fortalecimiento de los isquiotibiales y control excéntrico
Leg extension	2 x 8-10	2	3-0-3	2 min	Fortalecimiento específico del cuádriceps
Leg extension unilateral	1 x 6 por pierna	2	4-1-3	2 min	Control unilateral del cuádriceps y simetría entre miembros

Sesión 2. Trabajo dinámico, potencia controlada y transferencia funcional

Ejercicio	Series x repeticiones	RIR	Tempo	Descanso	Objetivo
Activación del cuádriceps con banda elástica	3 x 6-8	No aplica. Búsqueda de contracción voluntaria máxima, sensación muscular y conexión neuromuscular	Controlado	Durante las series de calentamiento del squat belt	Reclutamiento del cuádriceps y preparación neuromuscular
Imaginería motora del cuádriceps	3 min	—	—	—	Preparación cortical e intención motora
Squat belt con tempo lento	1 x 6	1-2	6-0-3	3 min	Control del cuádriceps y trabajo HSR
Squat belt dinámico	3 x 6	Sin fatiga ni pérdida clara de velocidad	1-0-1	3 min	Potencia controlada y producción rápida de fuerza
Zancadas dinámicas anteriores	3 x 6-8	Sin fatiga / modo cluster	1-0-1	2 min	Transferencia dinámica de la fuerza
Zancadas dinámicas laterales	3 x 6-8	Sin fatiga / modo cluster	1-0-1	2 min	Control frontal, estabilidad y transferencia funcional
Peso muerto rumano	2 x 3	2	3-0-1	3 min	Fuerza de cadena posterior
Step-up	2 x 6	Sin fatiga / modo cluster	1-0-1	3 min	Transferencia funcional y potencia unipodal

Sesión 3. Fuerza unilateral y control del miembro inferior

Ejercicio	Series x repeticiones	RIR	Tempo	Descanso	Objetivo
Activación del cuádriceps con banda elástica	3 x 6-8	No aplica. Búsqueda de contracción voluntaria máxima, sensación muscular y conexión neuromuscular	Controlado	Durante las series de calentamiento del squat belt	Reclutamiento del cuádriceps y preparación neuromuscular
Imaginería motora del cuádriceps	3-5 min	—	—	—	Preparación cortical e intención motora
Squat belt	2 x 8-12	2	2-1-2	2 min	Fuerza controlada del cuádriceps
Squat belt con tempo lento	1 x 6	1-2	6-0-3	3 min	Control del cuádriceps y trabajo HSR
Split squat o zancada posterior deslizada	3 x 8-12	2-3	2-1-2	2 min	Fuerza unilateral, control postural y estabilidad
Leg extension	2 x 8-10	2	3-0-3	2 min	Fortalecimiento específico del cuádriceps
Leg extension unilateral	1 x 6 por pierna	2	4-1-3	2 min	Control unilateral del cuádriceps y simetría entre miembros

Sesión complementaria semanal a partir de la semana 5
Esta sesión complementaria tendrá una intensidad baja o moderada y no tendrá como objetivo generar fatiga muscular importante. Su finalidad será reforzar la calidad del movimiento, la familiarización con tareas funcionales, la adaptación progresiva al trabajo específico y la monitorización de la respuesta articular.

Ejercicio	Series x repeticiones	Intensidad / RIR	Tempo	Descanso	Objetivo
Single-Leg Squat	3 x 6-8 por pierna	Sin fatiga, prioridad al control técnico	Lento	1-2 min	Fuerza, control del movimiento y alineación del miembro inferior
Lateral Step-Down	3 x 8 por pierna	Sin fatiga, prioridad al control técnico	Controlado	1-2 min	Control del valgo dinámico y estabilidad pélvica
Y-Balance drill	3 series	Control técnico	Controlado	1-2 min	Estabilidad dinámica
Perturbaciones ligeras	3 x 30 s	Baja carga	—	45-60 s	Adaptación motora y control neuromuscular
Desaceleraciones, aterrizajes, recepciones controladas y cambios de dirección progresivos	3 x 6 repeticiones	Prioridad absoluta a la calidad técnica	Controlado	45-60 s	Transferencia hacia el retorno al deporte y absorción progresiva de carga
Familiarización BIODEX	Trabajo submáximo: concéntrico 60°/s, 3 x 6 repeticiones; excéntrico 30°/s, 3 x 3 repeticiones	Sin fatiga	Controlado	3 min	Familiarización con el dispositivo y monitorización complementaria

Protocolos BIODEX registrados para la sesión complementaria

Cuando se utilice el BIODEX como herramienta complementaria de familiarización o monitorización, podrán emplearse protocolos piramidales progresivos de velocidad. Estos protocolos no formarán parte de la evaluación oficial, sino que se utilizarán como trabajo submáximo de adaptación al dispositivo.

Protocolo	Velocidades angulares utilizadas
P1	300-270-240-210-240-270-300°/s
P2	270-240-210-180-210-240-270°/s
P3	240-210-180-150-180-210-240°/s
P4	210-180-150-120-150-180-210°/s
P5	180-150-120-90-120-150-180°/s
P6	150-120-90-60-90-120-150°/s

Tabla 7 : Protocolo Biodex del CERS de Capbreton

Nota: La sesión complementaria no será considerada una evaluación oficial. Se utilizará únicamente como herramienta de familiarización, monitorización y adaptación progresiva al dispositivo BIODEX.

Progresión semana por semana

Semana	Objetivo dominante	Intensidad	Trabajo principal
1	Reactivación y conciencia del cuádriceps	RIR 4	Activación con banda elástica, imaginería motora, squat belt ligero y leg extension ligera
2	Control voluntario y calidad técnica	RIR 3-4	HSR ligero, squat belt controlado y fortalecimiento específico del cuádriceps
3	Estabilidad, activación y control unipodal básico	RIR 3-4	Squat belt, split squat, leg extension y primeros ejercicios de control funcional
4	Checkpoint de fase 1	RIR 3	Control técnico, tolerancia articular, calidad del movimiento y ajuste de cargas
5	Introducción de HSR más específico y sesión complementaria	RIR 3	Squat belt con tempo lento, leg extension unilateral, single-leg squat y lateral step-down
6	Progresión de la carga y control unilateral	RIR 2-3	Squat belt, split squat, leg extension, trabajo de isquiotibiales y control del miembro inferior
7	Control unipodal, perturbaciones y estabilidad dinámica	RIR 2-3	Step-down, Y-Balance drill, perturbaciones ligeras y tareas funcionales controladas
8	Checkpoint de fase 2	RIR 2-3	Evaluación de tolerancia, fuerza, control neuromuscular y calidad del movimiento
9	Alta carga controlada	RIR 2	Squat belt pesado controlado, leg extension intensa y trabajo funcional progresivo
10	Énfasis excéntrico avanzado	RIR 1-2	Tempo lento, control excéntrico, fuerza unilateral y tareas funcionales más exigentes
11	Transferencia funcional hacia gestos deportivos	RIR 1-2	Desaceleraciones, aterrizajes controlados, recepciones y cambios de dirección progresivos
12	Consolidación final y preparación para T2	RIR 1-2	Integración funcional, control de la carga, ajuste final y preparación para la evaluación final

Progresión semana por semana

Situación observada	Decisión
RIR > 3 en todas las series y técnica correcta	Aumentar ligeramente la carga
RIR 1-3 con técnica correcta	Mantener la carga
RIR 0 o pérdida técnica importante	Reducir la carga
Dolor > 4/10 en la escala EVA	Adaptar o detener el ejercicio
Aparición de derrame o aumento de inflamación	Reducir la intensidad y/o el volumen
Pérdida clara de velocidad o de control	Detener la serie
Dolor ≤ 3/10, técnica correcta y buena respuesta en las 24 horas posteriores	Mantener o progresar según tolerancia
Fatiga excesiva o degradación de la calidad del movimiento	Reducir el volumen o aumentar el descanso

Criterios técnicos a respetar

Criterio	Resultado esperado
Rodilla	Ausencia de valgo dinámico marcado
Tronco	Ausencia de compensaciones excesivas
Velocidad	Ejecución controlada, sin pérdida brusca de velocidad ni de control
Dolor	≤ 3-4/10 en la escala EVA
Movimiento	Amplitud controlada y técnica adecuada
Fatiga	Ausencia de degradación importante de la calidad del movimiento
Apoyo unipodal	Estabilidad suficiente sin pérdida repetida del equilibrio
Respuesta articular	Ausencia de aumento importante de inflamación en las 24 horas posteriores