

UNIVERSIDAD EUROPEA DE VALENCIA

Facultad de Ciencias de la Salud

Grado en Fisioterapia

Trabajo Fin de Grado

Curso 2025-2026

**Efectos de los ejercicios en cadena cinética
abierta, cerrada y combinada tras la reconstrucción del
ligamento cruzado anterior: revisión sistemática.**



Autora

Dña. Agathe Caiveau

Tutor

Dr. Alejandro Sendín Magdalena

Valencia, 2026

UNIVERSIDAD EUROPEA DE VALENCIA

Facultad de Ciencias de la Salud

Grado en Fisioterapia

Trabajo Fin de Grado

Curso 2025-2026

**Efectos de los ejercicios en cadena cinética
abierta, cerrada y combinada tras la reconstrucción del
ligamento cruzado anterior: revisión sistemática.**

TRABAJO FINAL DE GRADO PRESENTADO POR:

Dña. Agathe Caiveau

TUTOR/A DEL TRABAJO:

Dr. Alejandro Sendín Magdalena

Valencia, 2026

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres y a mis hermanas por su apoyo, su paciencia y sus ánimos durante todos estos años de estudio. Su presencia ha sido muy importante para mí a lo largo de este camino.

También quiero dar las gracias a mis amigos, que han estado a mi lado en cada etapa, por su apoyo y por todos los momentos compartidos. Una mención especial para Célia, por su amistad, su escucha y por estar siempre presente.

Agradezco también a mi tutor de prácticas por su acompañamiento, su disponibilidad y los consejos que me ha aportado durante la realización de este trabajo.

Por último, gracias a todas las personas que, de una forma u otra, han formado parte de este recorrido y han contribuido a que hoy pueda finalizar esta etapa.

ÍNDICE

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE	1
ABSTRACT AND KEYWORDS	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Anatomía y función del ligamento cruzado anterior.	3
1.2. Lesión del LCA: mecanismos, epidemiología y consecuencias clínicas.....	3
1.3. Tratamiento y reconstrucción del LCA.	4
1.4. Rehabilitación tras reconstrucción y recuperación de la fuerza muscular.	5
1.5. Ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada.	7
1.6. Justificación del tema	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo principal	10
2.2. Objetivos secundarios	10
3. MATERIAL Y MÉTODOS	10
3.1. Tipo de estudio	10
3.2. Metodología PICO	10
3.3. Bases de datos.....	11
3.4. Palabras claves	11
3.5. Criterios de elegibilidad	12
3.5.1. Criterios de inclusión	12
3.5.2. Criterios de exclusión	12
3.6. Estrategia de búsqueda y ecuación de búsqueda	12
3.7. Evaluación de calidad de búsqueda y selección de los artículos	13
3.7.1. Diagrama de Flujo	14
3.7.2. Evaluación de la calidad metodológica con la escala PEDro y la escala NOS.	15
3.7.3. Variables del estudio	15
3.7.4. Laxitud anterior de la rodilla	16
3.7.5. Fuerza muscular	16
3.7.6. Dolor	17
3.7.7. Rango de movimiento (ROM).....	17
3.7.8. Funcionalidad	17
4. RESULTADOS.....	18
4.1. Características generales de los estudios incluidos	18
4.2. Resultados por variable de estudio	19
4.2.1. Fuerza y resistencia muscular.....	19
4.2.2. Laxitud anterior de rodilla	20
4.2.3. Funcionalidad	21
4.2.4. Rango de movimiento.....	22
4.2.5. Dolor	22
4.3. Síntesis global de los hallazgos	23

5.	DISCUSIÓN	24
5.1.	Resumen de los principales hallazgos.....	24
5.2.	Discusión de los resultados por variable	25
5.2.1.	<i>Fuerza y resistencia muscular.....</i>	25
5.2.2.	<i>Laxitud anterior de rodilla</i>	25
5.2.3.	<i>Funcionalidad</i>	26
5.2.4.	<i>Rango de movimiento (ROM).....</i>	27
5.2.5.	<i>Dolor</i>	27
5.3.	Factores moduladores de los resultados	27
5.4.	Comparación con la literatura previa	28
5.5.	Aplicación clínica	29
5.6.	Limitaciones de la revisión.....	29
5.7.	Perspectivas y futuras líneas de investigación.....	30
6.	CONCLUSIÓN	30
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	32
8.	ANEXOS.....	36

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- ACL:** Anterior Cruciate Ligament (Ligamento Cruzado Anterior, terminología en inglés)
- ACLR:** Anterior Cruciate Ligament Reconstruction (Reconstrucción del Ligamento Cruzado Anterior)
- CKC:** Closed Kinetic Chain (Cadena Cinética Cerrada)
- EOKC:** Early Open Kinetic Chain (Inicio precoz de los ejercicios en cadena cinética abierta)
- GNRB:** GeNouRoB, artrómetro automatizado para la medición de la laxitud anterior de la rodilla
- IC:** Intervalo de Confianza
- IKDC:** International Knee Documentation Committee (escala de evaluación funcional de la rodilla)
- KAT 2000:** Kinesthetic Ability Trainer (sistema de evaluación del equilibrio y control postural)
- KOOS:** Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (escala de evaluación de la rodilla)
- KOOS-QOL:** Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score – Quality of Life (subescala de calidad de vida)
- KT-1000:** Artrómetro utilizado para cuantificar la traslación tibial anterior
- LCA:** Ligamento Cruzado Anterior
- LOKC:** Late Open Kinetic Chain (Inicio tardío de los ejercicios en cadena cinética abierta)
- LSI:** Limb Symmetry Index (Índice de Simetría entre Miembros)
- MeSH:** Medical Subject Headings (vocabulario controlado de términos biomédicos de PubMed)
- NOS:** Newcastle-Ottawa Scale (Escala Newcastle-Ottawa)
- NPRS:** Numeric Pain Rating Scale (Escala Numérica de Valoración del Dolor)
- OKC:** Open Kinetic Chain (Cadena Cinética Abierta)
- PEDro:** Physiotherapy Evidence Database (base de datos especializada en fisioterapia)
- PICO:** Population, Intervention, Comparison, Outcome (modelo para formular preguntas clínicas)
- PRISMA:** Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (guía para la elaboración de revisiones sistemáticas)
- PT/BW:** Peak Torque to Body Weight ratio (Relación entre el pico de torque y el peso corporal)
- RCT:** Randomized Controlled Trial (Ensayo Clínico Aleatorizado)
- ROM:** Range Of Motion (Rango de Movimiento)
- ST/G:** Semitendinoso/Grácil (tipo de injerto autólogo de isquiotibiales)
- VAS:** Visual Analogue Scale (Escala Visual Analógica del dolor)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las diferentes cadenas cinéticas.	7
Tabla 2: Estrategia de búsqueda.	13
Tabla 3: Síntesis de los resultados por variables.	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tasa de incidencia de lesión del ligamento cruzado anterior por modalidad deportiva.	4
Figura 2: Metodología PICO.....	11
Figura 3: Diagrama de flujo.	14

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Escala de Evaluación de la Calidad metodológica PEDro.	36
Anexo 2: Lista de verificación PRISMA 2020	37
Anexo 3: Evaluación de la calidad metodológica del estudio de Forelli et al. (2023) mediante la escala Newcastle-Ottawa (NOS).	38
Anexo 4: Tabla resultados	39
Anexo 5: Tabla de la variable: fuerza y resistencia.	42
Anexo 6: Tabla de la variable: Laxitud anterior de la rodilla	42
Anexo 7: Tabla de la variable: Funcionalidad	43
Anexo 8: Tabla de la variable: ROM	43
Anexo 9: Tabla de la variable: Dolor	44

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Antecedentes: La reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA) es un procedimiento quirúrgico frecuente que requiere un proceso de rehabilitación prolongado, en el que la recuperación de la fuerza del cuádriceps y la protección del injerto resultan esenciales. La selección de los ejercicios de fortalecimiento (en cadena cinética abierta (OKC), cerrada (CKC) o protocolos combinados) continúa siendo objeto de debate clínico.

Objetivo: Analizar los efectos de los ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada sobre la fuerza muscular, la laxitud anterior, el dolor, el rango de movimiento y la funcionalidad de la rodilla tras la reconstrucción del LCA.

Metodología: Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica siguiendo las directrices PRISMA. La búsqueda se efectuó en las bases de datos PubMed, PEDro y Cochrane Library, sin restricción de fecha. Se incluyeron ensayos clínicos aleatorizados, ensayos clínicos controlados y estudios de cohortes publicados en inglés o español que evaluaran al menos una de las variables principales. La calidad metodológica de los estudios incluidos se valoró mediante la escala PEDro para los ensayos clínicos y la escala Newcastle-Ottawa (NOS) para el estudio de cohortes.

Resultados: Se incluyeron diez estudios con un total de 533 participantes, con puntuaciones en la escala PEDro entre 4/10 y 8/10 (mediana 6/10). Los ejercicios en cadena cinética abierta se asociaron a una recuperación más rápida y completa de la fuerza del cuádriceps, especialmente cuando se introdujeron de forma precoz dentro de un rango articular restringido. La laxitud anterior no aumentó significativamente con el OKC controlado, salvo en pacientes con injerto de isquiotibiales y comienzo precoz. Los protocolos combinados (OKC+CKC) ofrecieron los resultados más completos en dolor, rango de movimiento, funcionalidad y fuerza muscular.

Conclusión: Las tres modalidades de ejercicio producen mejoras clínicas relevantes tras la reconstrucción del LCA. Los protocolos combinados se posicionan como la estrategia más completa, siempre que se individualicen según el tipo de injerto, la fase postoperatoria y la respuesta clínica del paciente.

Palabras clave: Ligamento Cruzado Anterior; Reconstrucción del Ligamento Cruzado Anterior; Rehabilitación; Ejercicio en Cadena Cinética Abierta; Ejercicio en Cadena Cinética Cerrada; Fuerza Muscular; Cuádriceps.

ABSTRACT AND KEYWORDS

Background: Anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction is a frequent surgical procedure that requires a prolonged rehabilitation process, in which quadriceps strength recovery and graft protection are essential. The selection of strengthening exercises (open kinetic chain (OKC) closed kinetic chain (CKC) or combined protocols) remains a subject of clinical debate.

Objective: To analyse the effects of open, closed and combined kinetic chain exercises on muscle strength, anterior knee laxity, pain, range of motion and knee function after ACL reconstruction.

Methods: A systematized review of the scientific literature was conducted following PRISMA guidelines. The search was performed in PubMed, PEDro and Cochrane Library databases, with no date restrictions. Randomized controlled trials controlled clinical trials and cohort studies published in English or Spanish that evaluated at least one of the main outcome variables were included. The methodological quality of the included studies was assessed using the PEDro scale for clinical trials and the Newcastle-Ottawa Scale (NOS) for the cohort study.

Results: Ten studies were included, with a total of 533 participants and PEDro scores ranging from 4/10 to 8/10 (median 6/10). Open kinetic chain exercises were associated with a faster and more complete recovery of quadriceps strength, particularly when introduced early within a restricted range of motion. Anterior knee laxity did not significantly increase with controlled OKC, except in patients with hamstring grafts and early onset. Combined protocols (OKC+CKC) provided the most complete outcomes in pain, range of motion, function and muscle strength.

Conclusion: The three exercise modalities produce clinically relevant improvements after ACL reconstruction. Combined protocols emerge as the most complete strategy, provided they are individualized according to graft type, postoperative phase and the patient's clinical response.

Keywords: *Anterior Cruciate Ligament; Anterior Cruciate Ligament Reconstruction; Rehabilitation; Open Kinetic Chain Exercise; Closed Kinetic Chain Exercise; Muscle Strength; Quadriceps.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Anatomía y función del ligamento cruzado anterior.

El ligamento cruzado anterior (LCA) es una estructura intraarticular fundamental para la estabilidad de la rodilla. Se localiza en la escotadura intercondílea y se extiende desde la zona intercondílea anterior de la tibia hasta la cara medial del cóndilo femoral lateral (1). Anatómicamente, se describe como un ligamento formado por dos haces principales: el haz anteromedial y el haz posterolateral. Ambos presentan patrones de tensión diferentes a lo largo del rango articular, lo que permite al LCA participar en el control de la traslación tibial anterior y de la estabilidad rotacional de la rodilla (1).

La función principal del LCA consiste en limitar la traslación anterior de la tibia respecto al fémur y contribuir al control de la rotación tibial interna y a la estabilidad frente a cargas combinadas (1). Esta función es especialmente importante en actividades deportivas que implican desaceleraciones, cambios de dirección, pivotes y recepciones de salto, donde la rodilla se expone a fuerzas rápidas y multidireccionales (2,3). Por ello, la estabilidad de la rodilla no depende únicamente de la integridad ligamentosa, sino también de la interacción entre las estructuras pasivas, la fuerza muscular y el control neuromuscular (4).

Más allá de su función mecánica, el LCA participa en la regulación propioceptiva de la articulación, contribuyendo a la estabilización dinámica de la rodilla (5,6). Su rotura compromete, por tanto, no solo la estabilidad pasiva, sino también la propiocepción, el control postural, la fuerza muscular y los patrones de movimiento, lo que la convierte en un problema ligamentoso, neuromuscular y funcional que requiere una recuperación integral.

1.2. Lesión del LCA: mecanismos, epidemiología y consecuencias clínicas.

Las lesiones del ligamento cruzado anterior representan una de las patologías deportivas más frecuentes a nivel mundial, particularmente en disciplinas que combinan cambios bruscos de dirección, movimientos de pivote y recepciones unipodales tras un salto (7,8). Aproximadamente el 70% de estas lesiones se producen por un mecanismo sin contacto directo, asociado a un déficit del control neuromuscular durante la desaceleración, el cambio de dirección o la recepción de un salto (7).

Determinados deportes presentan tasas de incidencia significativamente más elevadas. El fútbol femenino, el esquí alpino, el baloncesto femenino y la gimnasia se asocian a un riesgo especialmente alto, con tasas comprendidas entre 0,25 y 0,32 lesiones por cada 1.000 exposiciones-atleta, mientras que las modalidades masculinas equivalentes presentan tasas notablemente inferiores (9,10) (Figura 1). De forma global, las deportistas femeninas presentan

un riesgo de lesión del LCA entre 2 y 8 veces superior al de los deportistas masculinos en una misma disciplina, debido a factores anatómicos (mayor ángulo Q, escotadura intercondílea más estrecha), hormonales (variaciones del ciclo menstrual) y biomecánicos (mayor valgo dinámico de rodilla durante el salto) (11,12).

Paralelamente, la incidencia de reconstrucciones del LCA ha aumentado de forma considerable en las últimas décadas. En Inglaterra, la tasa ajustada por edad y sexo se multiplicó por 12 entre 1997 y 2017, pasando de 2,0 a 24,2 por 100.000 habitantes (13). En Australia, la incidencia global creció un 43% entre 2000 y 2015, alcanzando las 77,4 reconstrucciones por cada 100.000 habitantes (14). Este aumento refleja la magnitud clínica y social de esta lesión, así como el elevado número de pacientes que requieren procesos de rehabilitación prolongados.

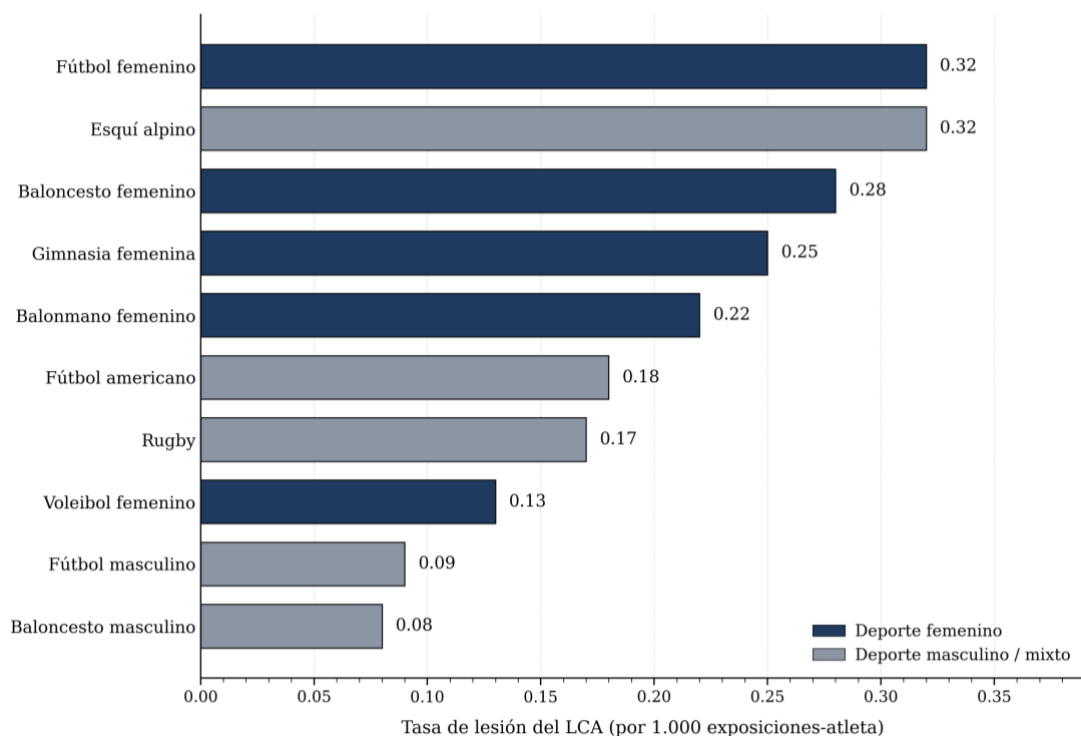


Figura 1: Tasa de incidencia de lesión del ligamento cruzado anterior por modalidad deportiva.

Fuente: Elaboración propia basada en los datos de Joseph et al. (2013), Montalvo et al. (2019), Boden et al. (2000) y Hewett et al. (2006).

1.3. Tratamiento y reconstrucción del LCA.

La elección del tratamiento tras una rotura del LCA depende del perfil del paciente, su edad, nivel de actividad, presencia de inestabilidad sintomática, lesiones asociadas y objetivos funcionales (4,15). El tratamiento conservador puede ser una opción válida en pacientes con menor demanda deportiva, ausencia de episodios repetidos de inestabilidad o buena capacidad de adaptación neuromuscular (4). La revisión sistemática y metaanálisis de Smith et al. no

demostró una superioridad clara y consistente de la reconstrucción quirúrgica sobre el tratamiento conservador para todas las variables clínicas y funcionales analizadas (4).

Además, resultados derivados del estudio KANON han cuestionado la idea tradicional de que un LCA roto no puede cicatrizar. Filbay et al. observaron evidencia de cicatrización del LCA en resonancia magnética en una parte de los pacientes tratados inicialmente con rehabilitación, especialmente en aquellos que no pasaron posteriormente a cirugía diferida (16). Estos pacientes mostraron mejores resultados en función deportiva y calidad de vida según la escala KOOS en comparación con los grupos sin cicatrización, reconstrucción precoz o reconstrucción diferida (16). Sin embargo, la indicación terapéutica debe individualizarse y no puede basarse únicamente en la posibilidad de cicatrización espontánea.

La reconstrucción del LCA se indica con frecuencia en pacientes jóvenes, activos o con intención de volver a deportes de pivote, sobre todo cuando existe inestabilidad funcional persistente (4,15). El objetivo de la cirugía es restaurar la estabilidad mecánica de la rodilla mediante un injerto que sustituye al ligamento lesionado (15). No obstante, la reconstrucción no garantiza por sí sola la recuperación completa de la fuerza, del control neuromuscular ni de la calidad del movimiento (5,6).

Los injertos autólogos más utilizados son el tendón rotuliano hueso-tendón-hueso, los tendones isquiotibiales y el tendón cuadricipital (15,17). La evidencia reciente muestra resultados clínicos y funcionales globalmente comparables entre estos injertos, aunque pueden existir diferencias en dolor de la zona donante, riesgo de fallo o recuperación muscular según el tipo de injerto empleado (18,19). Estas diferencias son relevantes para la rehabilitación, ya que el tipo de injerto puede influir en la progresión de ciertos ejercicios de fortalecimiento, especialmente durante las primeras fases postoperatorias (17,20).

Por tanto, el éxito funcional tras la reconstrucción del LCA no depende únicamente de la técnica quirúrgica, sino también de la evolución biológica del injerto, la recuperación de la fuerza muscular y la calidad del proceso de rehabilitación (15,17). En este sentido, la rehabilitación no debe organizarse solo en función del tiempo transcurrido desde la cirugía, sino mediante criterios objetivos como dolor, derrame, rango de movimiento, fuerza, control neuromuscular y rendimiento funcional (17).

1.4. Rehabilitación tras reconstrucción y recuperación de la fuerza muscular.

La rehabilitación tras la reconstrucción del LCA es un proceso progresivo cuyo objetivo principal es recuperar la función de la rodilla y permitir un retorno seguro a la actividad laboral, física o deportiva (17,21). Las guías clínicas actuales recomiendan una progresión basada en fases y en criterios funcionales, más que en una evolución exclusivamente temporal (17) debido a la variabilidad individual existente en dolor, inflamación, rango de movimiento, control

neuromuscular, fuerza y tolerancia a la carga después de la cirugía. Durante la fase inicial, los objetivos principales son controlar el dolor y el derrame, recuperar la extensión completa, mejorar el rango de movimiento, normalizar la marcha y reactivar el cuádriceps (17,21). Intervenciones complementarias como la crioterapia, la estimulación eléctrica neuromuscular o la rehabilitación domiciliar estructurada pueden formar parte del proceso, aunque la evidencia disponible no siempre es de alta calidad para todas ellas (22).

La recuperación de la fuerza muscular constituye uno de los pilares fundamentales de la rehabilitación tras la reconstrucción del LCA (17,23). La debilidad del cuádriceps es frecuente después de la cirugía y puede persistir durante meses, incluso cuando el paciente ha recuperado parte de su función cotidiana, lo que indica que muchos pacientes pueden volver a la actividad con asimetrías todavía significativas (6,23). Estos déficits no se explican únicamente por la atrofia muscular: la inhibición artrogénica puede limitar la activación voluntaria del cuádriceps y persistir incluso cuando el dolor o la inflamación han disminuido, pudiendo afectar también al miembro contralateral (5,6). La fuerza del cuádriceps resulta esencial para controlar la flexión de rodilla en carga, absorber impactos, estabilizar la extremidad durante tareas dinámicas y permitir una progresión segura hacia actividades deportivas.

Un riesgo frecuente durante la rehabilitación es avanzar hacia tareas funcionales complejas sin haber recuperado una fuerza suficiente del mecanismo extensor (23). En estos casos, el paciente puede realizar ejercicios como sentadillas, step-ups o saltos mediante estrategias compensatorias que reducen la participación del cuádriceps del lado operado y desplazan la carga hacia la cadera, el tronco o la extremidad contralateral. Por este motivo, la recuperación debe basarse en una sobrecarga progresiva real, con intensidad y volumen suficientes para generar adaptaciones musculares (15,17).

La evaluación objetiva de la fuerza mediante dinamometría isométrica o isocinética permite cuantificar los déficits y orientar la progresión de la carga (17). En la práctica clínica, también se utiliza con frecuencia el índice de simetría entre miembros (limb symmetry index, LSI), considerándose un valor superior al 90 % como referencia mínima para fuerza y pruebas funcionales, aunque este criterio no garantiza por sí solo un retorno seguro al deporte (17,23). Su utilidad reside en detectar déficits residuales que pueden pasar desapercibidos clínicamente, pero debe interpretarse con cautela: la extremidad contralateral no siempre representa una referencia normal, ya que pueden existir adaptaciones bilaterales tras una lesión unilateral (5,6). Por ello, la simetría debe valorarse junto con la fuerza absoluta, la tolerancia a la carga, el dolor, la laxitud, la calidad del movimiento y los factores psicológicos relacionados con el retorno a la actividad (17).

En este contexto, la selección de ejercicios de fortalecimiento adquiere una importancia clínica directa. Los ejercicios en cadena cinética cerrada permiten integrar patrones funcionales en apoyo, mientras que los ejercicios en cadena cinética abierta facilitan un estímulo más específico sobre el cuádriceps (24,25). Por ello, analizar el efecto de los ejercicios en cadena

abierta, cerrada y combinada sobre la fuerza, la función, el dolor, la laxitud y la simetría intermiembros resulta fundamental para comprender su papel dentro de la rehabilitación tras la reconstrucción del LCA (24).

1.5. Ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada.

Los ejercicios en cadena cinética abierta y cerrada forman parte habitual de los programas de rehabilitación tras la reconstrucción del LCA (17,26). La cadena cinética cerrada se caracteriza por ejercicios en los que el segmento distal permanece fijo, como la sentadilla, el leg press, los step-ups o los lunges (25). En cambio, la cadena cinética abierta se caracteriza por ejercicios en los que el segmento distal se mueve libremente, como la extensión de rodilla en sedestación (24,25).

Tabla 1: Clasificación de las diferentes cadenas cinéticas.

	Definición	Ejemplos de ejercicios	Interés dentro de la rehabilitación	Limitaciones y precauciones
CADENA CINÉTICA ABIERTA	El segmento distal se mueve libremente y el trabajo suele centrarse de forma más específica en la rodilla (24).	Extensión de rodilla en sedestación. Extensión de rodilla con resistencia progresiva. Trabajo analítico del cuádriceps.	Puede ser útil para mejorar de manera más directa la fuerza del cuádriceps, especialmente cuando persisten déficits del mecanismo extensor tras la cirugía (23,27).	Debe controlarse el rango de movimiento, la carga y el momento de introducción. En las primeras fases se recomienda especial precaución cerca de la extensión completa por el posible aumento de la tensión sobre el injerto (25).
CADENA CINÉTICA CERRADA	El segmento distal permanece fijo o apoyado, por lo que el movimiento implica de forma conjunta cadera, rodilla y tobillo (21,25).	Sentadilla. Prensa de pierna. Step-up. Zancadas. Ejercicios en apoyo monopodal.	Permite trabajar patrones más funcionales y próximos a las actividades diarias o deportivas. Además, favorece la contracción muscular y el control global del miembro inferior (17,21).	Aunque se considera una opción funcional, no siempre asegura una activación suficiente del cuádriceps. El paciente puede compensar con la cadera, el tronco o la extremidad contralateral si la técnica no se controla adecuadamente (6).
CADENA CINÉTICA COMBINADA	Integra ambas modalidades dentro de un mismo programa, adaptando los ejercicios según la fase y la tolerancia del paciente (28–30).	Programa que combina sentadillas. Prensa o step-ups con ejercicios controlados de extensión de rodilla en cadena abierta.	Busca aprovechar el trabajo funcional de la cadena cerrada y el estímulo más específico sobre el cuádriceps que ofrece la cadena abierta. Puede ser especialmente interesante en fases de fortalecimiento progresivo (29,30).	La progresión debe individualizarse según el tipo de injerto, dolor, derrame, rango articular, fuerza y respuesta a la carga. No debe aplicarse de forma rígida, sino según criterios clínicos (17).

Fuente: Elaboración propia.

La cadena cerrada ha sido tradicionalmente considerada una opción funcional, ya que reproduce tareas en apoyo, favorece la cocontracción entre cuádriceps e isquiotibiales y se aproxima a patrones propios de actividades cotidianas o deportivas (25,31). Por esta razón, muchos protocolos han priorizado históricamente los ejercicios en cadena cerrada durante las primeras fases posteriores a la reconstrucción (17,31). Sin embargo, no siempre garantiza una activación suficiente del cuádriceps, especialmente cuando el paciente utiliza estrategias compensatorias (5,6,23). La cadena abierta, en cambio, permite trabajar de forma más específica el mecanismo extensor de la rodilla, lo que puede ser especialmente relevante cuando persisten déficits de fuerza del cuádriceps (24,32).

La principal controversia relacionada con la cadena abierta se basa en el posible aumento de las fuerzas de cizalla anterior y de la tensión sobre el injerto cerca de la extensión completa. Wilk et al. (1996) describieron que la extensión de rodilla en cadena abierta puede generar fuerzas de cizalla anterior entre aproximadamente 38° y 10° de flexión, con un pico cercano a la extensión terminal. Esta observación ha llevado a que algunos protocolos restrinjan el rango articular y la carga durante la introducción inicial de este tipo de ejercicios (17,25). No obstante, los ensayos clínicos disponibles sugieren que la cadena abierta, cuando se introduce de manera controlada, no produce un aumento clínicamente relevante de la laxitud anterior (33–35), aunque algunos resultados muestran cierta heterogeneidad según el tipo de injerto utilizado (20). Por ello, su efecto depende también del rango articular, la carga, el momento de introducción y la progresión empleada (17,24).

Las guías clínicas actuales recomiendan introducir los ejercicios en cadena abierta desde la cuarta semana postoperatoria en un rango restringido de 90° a 45°, permitiendo resistencia externa en pacientes con injerto rotuliano y evitando carga adicional durante las primeras 12 semanas en pacientes con injerto de isquiotibiales (17).

La evidencia disponible no establece una superioridad clara y universal de una modalidad sobre la otra. Las revisiones sistemáticas de Pamboris et al. (2024) y Culvenor et al. (2022) concluyeron que ambas modalidades son igualmente efectivas para la fuerza del cuádriceps, la función autorreportada y la laxitud de rodilla. A pesar de esta equivalencia general, algunos estudios sugieren beneficios diferenciados según la variable analizada (32,36,37), lo que indica que la elección no debería plantearse de forma absoluta, sino en función de los objetivos terapéuticos y de la fase de recuperación.

Los protocolos combinados buscan integrar las ventajas de ambas estrategias: la cadena cerrada aporta beneficios funcionales en apoyo, mientras que la cadena abierta ofrece un estímulo más específico sobre el cuádriceps (24,25). Trabajos recientes sugieren que su combinación podría mejorar la fuerza, el dolor, el rango de movimiento y la funcionalidad sin comprometer la seguridad del injerto (28–30).

Por tanto, el debate actual no debería centrarse en permitir o prohibir los ejercicios en cadena abierta, sino en determinar cómo, cuándo y con qué parámetros deben integrarse en la rehabilitación (24,27). La carga, el rango articular, el tipo de injerto, la fase de recuperación y los objetivos funcionales deben guiar la selección de los ejercicios (17,24), lo que justifica el análisis comparativo de los efectos de las tres modalidades tras la reconstrucción del LCA.

1.6. Justificación del tema

La rehabilitación tras la reconstrucción del LCA sigue siendo un aspecto clave en fisioterapia musculoesquelética y deportiva, ya que muchos pacientes mantienen déficits de fuerza, simetría, control neuromuscular y calidad del movimiento durante meses después de la cirugía (6,13,14,17,23). Estos déficits pueden retrasar el retorno a la actividad física o deportiva y hacen necesario el uso de programas de rehabilitación progresivos, individualizados y basados en criterios objetivos (5,17).

Dentro de este proceso, la elección de los ejercicios terapéuticos resulta fundamental. Los ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada se emplean de forma habitual, aunque la literatura no establece una superioridad clara de una modalidad sobre las demás (22,27,31). Esta falta de consenso puede deberse a la heterogeneidad de los estudios, especialmente en relación con el tipo de injerto, el momento de introducción de los ejercicios, los rangos articulares utilizados, la carga aplicada y las variables evaluadas (24,27).

Por ello, resulta pertinente revisar de forma estructurada los efectos de estas modalidades de ejercicio tras la reconstrucción del LCA, especialmente sobre variables como la fuerza muscular, la laxitud anterior, el dolor, el rango de movimiento, la función y la simetría intermiembros (24,27). Este análisis puede aportar criterios útiles para orientar la progresión del fortalecimiento y favorecer una práctica clínica más precisa y adaptada a las características de cada paciente (17,24,29).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo principal

Analizar los efectos de los ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada sobre el dolor, la laxitud anterior, la fuerza muscular, el rango de movimiento y la función de la rodilla tras la reconstrucción del LCA.

2.2. Objetivos secundarios

- Comparar los efectos de OKC y CKC sobre la laxitud anterior.
- Analizar su influencia sobre la fuerza del cuádriceps y de los isquiotibiales.
- Evaluar los cambios en dolor, ROM y funcionalidad.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

La búsqueda bibliográfica se inició en enero 2026, estableciéndose como fecha de entrega del Trabajo Fin de Grado el 21 de mayo de 2026. La elección del tema se fundamentó en el interés por analizar cómo diferentes protocolos de rehabilitación pueden influir en la recuperación funcional tras una reconstrucción del ligamento cruzado anterior (ACLR).

3.1. Tipo de estudio

La investigación realizada es una revisión sistemática de la literatura científica sobre los efectos de los ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada tras la reconstrucción del LCA, y su impacto sobre la laxitud anterior y la fuerza del cuádriceps.

3.2. Metodología PICO

La presente investigación se estructura mediante el modelo PICO, con el fin de formular una pregunta clínica precisa y bien delimitada. Mediante este enfoque, se pretende comparar los efectos de los ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada tras la reconstrucción del LCA, evaluando su impacto sobre la laxitud anterior, la fuerza del cuádriceps, el dolor y la funcionalidad en los pacientes afectados.

Pregunta de investigación (PICO):

En pacientes adultos tras reconstrucción del LCA, ¿Qué efectos tienen los ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada sobre la laxitud anterior, la fuerza muscular, el dolor y la función de la rodilla?



Figura 2: Metodología PICO.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Bases de datos

La búsqueda de artículos para la revisión sistemática se ha realizado sobre PubMed, PEDro y Cochrane. PubMed reúne principalmente literatura biomédica y de ciencias de la salud, con artículos científicos publicados en revistas. PEDro es una base orientada a la fisioterapia que permite localizar rápidamente ensayos clínicos, revisiones y otros estudios, además de aportar información sobre su calidad metodológica. Por último, Cochrane Library destaca por compilar revisiones sistemáticas rigurosas y evidencia sintetizada, útil para apoyar decisiones clínicas basadas en pruebas.

3.4. Palabras claves

Se emplearon descriptores MeSH y términos en texto libre relacionados con la lesión y el procedimiento (Anterior Cruciate Ligament, LCA reconstruction, Anterior Cruciate Ligament Reconstruction), la rehabilitación y el trabajo del cuádriceps (Rehabilitation, Exercise Therapy, Resistance Training, Open Kinetic Chain, Knee Extension, Quadriceps, Muscle Strength) y los resultados principales (Knee Joint Laxity, Anterior Tibial Translation, artrometría).

Asimismo, se incluyeron sinónimos y abreviaturas frecuentes (ACL, ACLR) para aumentar la sensibilidad de la búsqueda.

3.5. Criterios de elegibilidad

La selección de los artículos tras su búsqueda se ha realizado según los criterios de inclusión y exclusión detallados a continuación.

3.5.1. Criterios de inclusión

- Estudios realizados sobre pacientes adultos sometidos a reconstrucción primaria del ACL (ACLR).
- Estudios que evalúen ejercicios en CCA, CCC o combinada.
- Estudios que comparen dos o más enfoques de rehabilitación, o diferentes formas de introducción del trabajo en cadena abierta.
- El estudio debe reportar al menos uno de los siguientes resultados principales:
 - o Dolor y funcionalidad
 - o Laxitud anterior y ROM
 - o Fuerza del cuádriceps
- Ensayos clínicos aleatorizados (RCT) y ensayos clínicos controlados y estudios de cohortes.

3.5.2. Criterios de exclusión

- Estudios que no incluyan reconstrucción de LCA.
- Estudios sin grupo comparador o sin resultados explotables.
- Estudios que no permitan identificar el tipo de intervención.
- Protocolos centrados exclusivamente en técnicas quirúrgicas o farmacológicas.
- Estudios con una evaluación PEDro inferior a 4/10.

3.6. Estrategia de búsqueda y ecuación de búsqueda

Con el fin de responder a los objetivos planteados, se elaboró una estrategia de búsqueda orientada a identificar estudios que analizaran los efectos de los ejercicios en cadena cinética abierta (OKC), cadena cinética cerrada (CKC) y protocolos combinados en pacientes sometidos a reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA/ACL). La búsqueda se centró en investigaciones que evaluaran principalmente variables como la laxitud anterior, la fuerza muscular, el dolor, la funcionalidad y el rango de movimiento (ROM).

La búsqueda bibliográfica se realizó en PubMed, Cochrane Library y PEDro. En PubMed y Cochrane, los términos se combinaron mediante operadores booleanos AND y OR, agrupando sinónimos con OR y relacionando los conceptos principales con AND. Para aumentar la precisión, se utilizaron comillas en expresiones exactas, como “open kinetic chain”, “closed kinetic chain” y “knee extension”, así como paréntesis para organizar correctamente las ecuaciones de búsqueda. En PubMed se priorizó el campo [Title/Abstract], mientras que en Cochrane se utilizaron las herramientas de la plataforma para limitar la búsqueda a términos presentes en el título o el resumen cuando resultó necesario.

En PEDro, al no disponer de una indexación MeSH equivalente, la búsqueda se efectuó mediante palabras clave en inglés relacionadas con la reconstrucción del LCA y los tipos de ejercicio analizados. Posteriormente, los resultados se revisaron manualmente para confirmar su pertinencia respecto al objetivo de la revisión.

Cuando fue posible, se aplicaron filtros por tipo de estudio, priorizando ensayos clínicos aleatorizados y estudios controlados. Además, se comprobó que los artículos seleccionados evaluaran al menos una de las variables principales de interés: laxitud anterior, fuerza muscular, dolor, funcionalidad o rango de movimiento.

Tabla 2: Estrategia de búsqueda.

Base de datos	Ecuación de búsqueda (Sin filtros)	Resultados	Filtros aplicados	Resultados
PubMed	("Anterior Cruciate Ligament Reconstruction"[Mesh] OR "ACL reconstruction"[tiab] OR "anterior cruciate ligament reconstruction"[tiab] OR ACLR[tiab]) AND ("open kinetic chain"[tiab] OR OKC[tiab] OR "knee extension"[tiab] OR "knee extensions"[tiab]) AND (rehabilitation[tiab] OR exercise*[tiab] OR "exercise therapy"[Mesh])	n = 301	Randomized Controlled Trial (RCT) + Clinical Trial	n = 46
Cochrane Library	("ACL reconstruction" OR "anterior cruciate ligament reconstruction" OR ACLR) AND ("open kinetic chain" OR OKC OR "knee extension") AND (rehabilitation OR exercise OR "exercise therapy")	n = 130	Fuentes : todas excepto PubMed	n = 86
PEDro	ACL reconstruction AND ("open kinetic chain" OR "knee extension")	n = 19	No aplicados	n = 19

Fuente: Elaboración propia.

3.7. Evaluación de calidad de búsqueda y selección de los artículos

3.7.1. Diagrama de Flujo

Tras la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos PubMed, Cochrane Library y PEDro, se identificaron inicialmente 450 referencias. Después de la eliminación de duplicados, se procedió al cribado de los estudios mediante la lectura del título y del resumen. Posteriormente, los artículos potencialmente relevantes fueron evaluados a texto completo según los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos.

Finalmente, se incluyeron diez estudios en la presente revisión sistemática. El proceso completo de selección se presenta en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 3, donde se recoge el número de referencias identificadas en cada base de datos, los estudios excluidos en cada fase y los motivos de exclusión correspondientes).

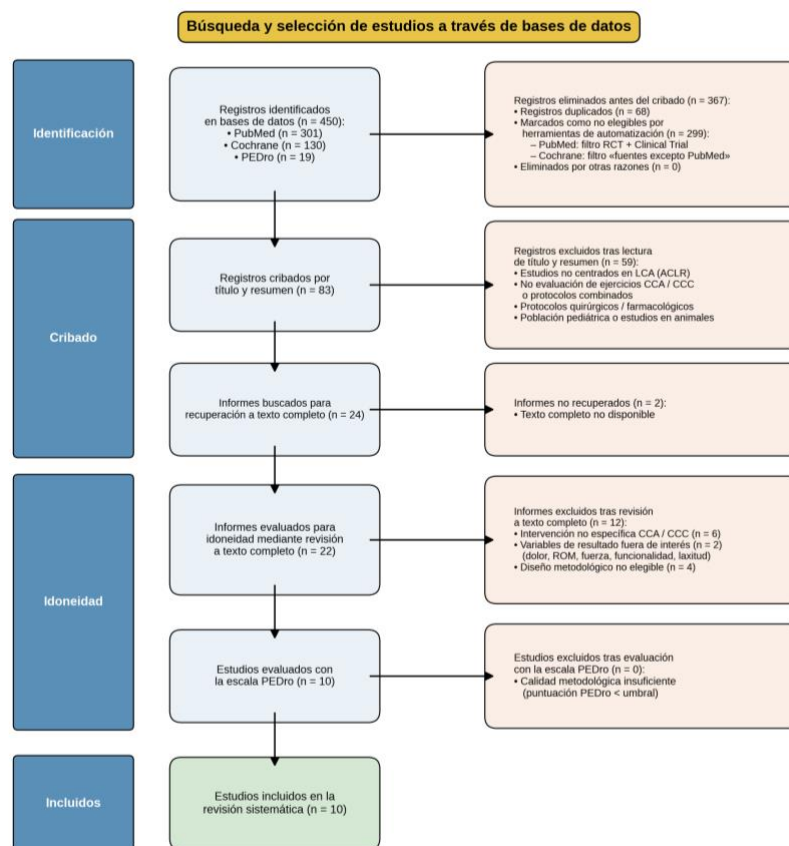


Figura 3: Diagrama de flujo.

Fuente: Elaboración propia siguiendo los criterios PRISMA 2020 (Page et al. 2021)

3.7.2. Evaluación de la calidad metodológica con la escala PEDro y la escala NOS.

La calidad metodológica de los estudios incluidos se evaluó mediante dos herramientas complementarias, seleccionadas según el diseño de cada estudio. Para los nueve ensayos clínicos se utilizó la escala PEDro, ampliamente empleada en fisioterapia. Para el estudio observacional de cohortes de Forelli et al. (2023) se aplicó la Newcastle-Ottawa Scale (NOS), ya que varios ítems de la escala PEDro (asignación aleatoria, ocultación de la asignación, cegamiento, análisis por intención de tratar) no son aplicables a este diseño y penalizarían artificialmente su puntuación.

La escala PEDro analiza la validez interna y la fiabilidad de los ensayos clínicos mediante once criterios, expresándose la puntuación final sobre un máximo de 10 puntos. Los resultados se interpretan como calidad alta ($\geq 7/10$), moderada (4-6/10) o baja ($\leq 3/10$). En la presente revisión, las puntuaciones oscilaron entre 4/10 y 8/10, con una mediana de 6/10. Obtuvieron calidad alta los estudios de Fukuda et al. (2013) con 8/10 y Khan et al. (2025) con 7/10. Cinco estudios presentaron calidad moderada (5-6/10): Morrissey et al. (2002), Perry et al. (2005), Heijne y Werner (2007), Kang et al. (2012) y Uçar et al. (2014). Finalmente, Morrissey et al. (2000) y Hooper et al. (2001) obtuvieron 4/10, correspondiente a una calidad moderada-baja. El análisis detallado se presenta en el Anexo 1.

La escala NOS evalúa los estudios observacionales mediante tres dominios (selección, comparabilidad y outcome), con una puntuación total entre 0 y 9 estrellas, interpretándose como calidad alta (7-9), moderada (4-6) o baja (0-3). El estudio de Forelli et al. (2023) obtuvo 7/9 estrellas, correspondiente a una calidad metodológica alta, gracias al apareamiento riguroso de los grupos por sexo, edad, IMC y nivel deportivo, al uso de instrumentos objetivos estandarizados (dinamometría isocinética y artrometría GNRB) y a un seguimiento completo a 3 y 6 meses. El análisis detallado se presenta en el Anexo 3.

3.7.3. Variables del estudio

Se seleccionaron como variables principales la laxitud anterior de la rodilla y la fuerza muscular del miembro inferior, especialmente la del cuádriceps, por ser los desenlaces más directamente relacionados con la seguridad y la eficacia de los ejercicios en cadena cinética abierta tras la reconstrucción del LCA, tal y como subrayan las guías de práctica clínica y las revisiones sistemáticas más recientes sobre esta lesión (17,21,24,27). Como variables secundarias se consideraron el dolor, el rango de movimiento (ROM) y la funcionalidad, ya que permiten valorar la evolución clínica global del paciente y facilitan la comparación entre los estudios incluidos (17,22). Los ensayos analizados emplearon distintos instrumentos de medida en función del protocolo de rehabilitación aplicado y del momento del seguimiento.

3.7.4. Laxitud anterior de la rodilla

La laxitud anterior de la rodilla constituye un indicador objetivo de la estabilidad articular y de la posible repercusión de los ejercicios en cadena cinética abierta sobre el injerto (24,25,27). En los estudios incluidos, esta variable se evaluó mediante artrometría, comparando el desplazamiento anterior de la tibia de la rodilla intervenida con respecto a la contralateral sana, y expresando habitualmente la diferencia en milímetros.

El KT-1000 arthrometer se utilizó como método de referencia para cuantificar la traslación tibial anterior, siendo empleado por Heijne y Werner (20) y Mikkelsen et al. (28). El Rolimeter, que permite valorar la laxitud anterior mediante la prueba de Lachman instrumentada, fue empleado por Fukuda et al. (33). El Knee Signature System fue utilizado por Perry et al. (35) para la medición artrométrica en fases tempranas del postoperatorio. Por su parte, el GNRB arthrometer, que ofrece una medición automatizada y más reproducible de la laxitud del injerto, fue el instrumento elegido por Forelli et al. (29) en el estudio más reciente con inicio precoz del OKC. Finalmente, Morrissey et al. (38) valoraron la laxitud mediante la prueba clínica de Lachman complementada con la circunferencia de la rodilla. En algunos trabajos, esta valoración se completó con pruebas clínicas adicionales, como el pivot shift, con el fin de explorar también la estabilidad rotacional de la rodilla (20,35).

3.7.5. Fuerza muscular

La fuerza muscular fue otra de las variables centrales de esta revisión, ya que el déficit del cuádriceps tras la reconstrucción del LCA constituye uno de los principales factores limitantes de la recuperación funcional y del retorno al deporte (5,6,23). El objetivo principal de los ejercicios en cadena cinética abierta es precisamente mejorar el rendimiento muscular, sobre todo del cuádriceps, sin comprometer la estabilidad del injerto (24,27). Además, varios estudios analizaron también la recuperación de la musculatura isquiosural, dada su relevancia en el control dinámico de la rodilla y en la coactivación protectora del LCA (29,33).

Para su valoración se emplearon distintos métodos de dinamometría isométrica e isocinética. El dinamómetro Kin-Com fue utilizado por Morrissey et al. (34), Perry et al. (35) y Heijne y Werner (20) para cuantificar el torque muscular concéntrico y excéntrico del cuádriceps y de los isquiotibiales. El Biodex System III fue empleado por Kang et al. (36) y Fukuda et al. (33), mientras que Forelli et al. (29) recurrieron a un sistema isocinético equivalente, integrando indicadores como el Limb Symmetry Index (LSI) y el Peak Torque to Body Weight ratio (PT/BW), especialmente útiles para objetivar la simetría entre miembros y la recuperación funcional. Estos dispositivos permiten cuantificar parámetros específicos como el peak torque, la potencia media o la resistencia muscular, así como la relación entre la extremidad intervenida y la contralateral sana (20,29,32,33). En el caso de Fukuda et al. (33), la valoración de la fuerza se completó con pruebas funcionales de salto unipodal (single-legged hop test y crossover hop test).

3.7.6. Dolor

El dolor fue considerado una variable clínica secundaria de gran interés, especialmente en las fases iniciales de la rehabilitación, ya que condiciona la tolerancia al ejercicio, la progresión de la carga y la participación activa del paciente en el tratamiento (17). En los estudios incluidos, se evaluó mediante instrumentos de autoevaluación ampliamente validados en la práctica clínica.

La Visual Analogue Scale (VAS), que permite registrar la intensidad dolorosa en un modelo visual, fue la herramienta utilizada por Uçar et al. (37) y Khan et al. (30). La Numeric Pain Rating Scale (NPRS), en la que el paciente valora la intensidad del dolor en una escala numérica de 0 a 10, fue empleada por Fukuda et al. (33). Heijne y Werner (20) utilizaron un anterior knee pain score específicamente adaptado para pacientes con reconstrucción del LCA, con el fin de valorar el dolor anterior de rodilla asociado al mecanismo extensor. Por último, Hooper et al. (26) analizaron el dolor mediante preguntas específicas del Hughston Clinic Questionnaire, centradas en la frecuencia del dolor, su intensidad máxima y la presencia de molestias en sedestación prolongada. En conjunto, estas herramientas permitieron valorar tanto el dolor general de la rodilla como el dolor asociado específicamente a la región femoropatelar.

3.7.7. Rango de movimiento (ROM)

El rango de movimiento se incluyó como variable secundaria por su importancia en la recuperación precoz de la función articular tras la cirugía (17,21). La restauración progresiva de la flexión y la extensión de la rodilla es un objetivo fundamental en los protocolos de rehabilitación, y además condiciona la posibilidad de avanzar hacia ejercicios más exigentes y la progresión de la carga sobre el injerto.

La medición del ROM se realizó principalmente mediante goniómetro universal, tanto para la flexión como para la extensión de la rodilla, registrándose en algunos estudios el movimiento activo y en otros el pasivo (30,37). Esta variable fue especialmente relevante en los estudios que compararon el inicio precoz frente al tardío del OKC (20,33) y en los que evaluaron protocolos combinados (30). Además, el ROM no solo fue un desenlace, sino también un criterio operativo del diseño de la intervención: Fukuda et al. (33) introdujeron el OKC en un rango restringido entre 45° y 90° con el fin de limitar las fuerzas de cizallamiento sobre el injerto descritas previamente en los estudios biomecánicos clásicos (25), mientras que Khan et al. (30) delimitaron el trabajo combinado entre 60° y 90° con el mismo objetivo de seguridad articular.

3.7.8. Funcionalidad

La funcionalidad se consideró una variable secundaria esencial, ya que permite valorar el impacto real del tratamiento sobre la capacidad del paciente para realizar actividades

cotidianas, desplazarse con normalidad y progresar hacia la vuelta al deporte (17,22). A diferencia de la laxitud o la fuerza, que describen aspectos más específicos, la funcionalidad ofrece una visión más global del resultado clínico.

La escala más frecuentemente utilizada fue el Lysholm Knee Scoring Scale, ampliamente empleada para valorar síntomas y limitaciones funcionales relacionadas con la rodilla, presente en los trabajos de Fukuda et al. (33), Uçar et al. (37), Mikkelsen et al. (28) y Khan et al. (30). Fukuda et al. (33) complementaron esta valoración con pruebas de salto unipodal (single-legged hop test y crossover hop test), que permiten explorar de forma más dinámica la función del miembro inferior. Hooper et al. (26) emplearon el Hughston Clinic Questionnaire y recurrieron al análisis biomecánico de la marcha y de la subida y bajada de escaleras, con el fin de objetivar la recuperación funcional en tareas concretas. De forma complementaria, Heijne y Werner (20) valoraron también el equilibrio y el control postural mediante el KAT 2000 (Kinesthetic Ability Trainer), entendiendo que estos aspectos forman parte de la recuperación neuromuscular global de la rodilla tras la reconstrucción del LCA.

4. RESULTADOS

4.1. Características generales de los estudios incluidos

Los diez estudios incluidos reunieron 533 participantes sometidos a reconstrucción del ligamento cruzado anterior (ACLR), con un tamaño muestral por estudio entre 36 (36) y 103 participantes (29) y una media aproximada de 53. Predominó el sexo masculino (67–80%) y la edad media se situó entre los 25 y los 35 años.

Ocho de los diez estudios fueron ensayos clínicos aleatorizados (cinco con cegamiento de participantes o evaluadores); Hooper et al. (2001) presentó un diseño prospectivo no ciego y Forelli et al. (2023) un estudio observacional de cohortes. La calidad metodológica de los nueve ensayos clínicos osciló entre 4/10 y 8/10 en la escala PEDro, mientras que el estudio de cohortes de Forelli et al. (2023) obtuvo 7/9 en la escala de Newcastle-Ottawa, correspondiente a una calidad metodológica alta. El tipo de injerto se especificó en tres estudios: Forelli et al. (2023) y Fukuda et al. (2013) emplearon injerto de semitendinoso y grácil, y Heijne y Werner (2007) compararon injerto rotuliano hueso-tendón-hueso e isquiotibiales generando cuatro subgrupos según el tipo de injerto y el momento de inicio del OKC: P4 y P12 (injerto rotuliano, con inicio del OKC en la semana 4 y en la semana 12 respectivamente) y H4 y H12 (injerto de isquiotibiales, con inicio del OKC en la semana 4 y en la semana 12 respectivamente). Las características generales de cada estudio se presentan en la Tabla del anexo 4.

Las intervenciones se agruparon en tres modalidades: cadena cinética cerrada (CKC), cadena cinética abierta (OKC) y protocolos combinados (OKC+CKC). La duración osciló entre 4 semanas (26,34) y 25 semanas (33), con una frecuencia habitual de tres sesiones semanales y seguimientos de hasta 17 meses postoperatorios. Cuatro estudios evaluaron la fase temprana (semanas 2–6), dos la fase intermedia (semanas 8–14) y los cuatro restantes seguimientos de 6 meses o más. Los detalles de cada protocolo se recogen también en la Tabla Anexo 4.

4.2. Resultados por variable de estudio

A continuación, se presentan los resultados de los estudios incluidos organizados según las variables principales de esta revisión: fuerza y resistencia muscular, laxitud anterior de rodilla, funcionalidad, rango de movimiento y dolor. La síntesis detallada de los resultados por variable se recoge en las Tablas anexo 5-9, donde se especifican los instrumentos de medida, los momentos de evaluación, los resultados obtenidos en cada grupo de intervención y las diferencias estadísticamente significativas detectadas.

4.2.1. Fuerza y resistencia muscular

Cuatro estudios evaluaron la fuerza muscular como variable principal o secundaria, utilizando principalmente dinamometría isocinética. Los dispositivos empleados incluyeron sistemas como Kin-Com, Biodex System III y Humac Norm. Las variables analizadas fueron el peak torque, el limb symmetry index (LSI), la relación peak torque/body weight (PT/BW) y diferentes indicadores de resistencia muscular.

Aunque los dispositivos isocinéticos empleados varían, todos cuantifican parámetros equivalentes, lo que permite una comparación cualitativa entre estudios, si bien las diferencias de calibración limitan la equivalencia exacta de los valores absolutos.

Kang et al. (2012) compararon los efectos de los ejercicios en OKC y CKC sobre la fuerza isocinética de los extensores de rodilla en 36 pacientes durante 12 semanas, a una velocidad angular de 60°/s en un rango articular de 0° a 90°. Ambos grupos mostraron mejoras significativas respecto al pretest, aunque el grupo OKC presentó mayores ganancias en la fuerza isocinética y en la resistencia muscular de los extensores de rodilla en comparación con el grupo CKC.

Fukuda et al. (2013) analizaron el efecto del inicio precoz frente al inicio tardío del trabajo en OKC. El grupo de inicio precoz comenzó los ejercicios en cadena abierta en la semana 4, mientras que el grupo de inicio tardío los inició en la semana 12. Los resultados mostraron una recuperación más rápida de la fuerza del cuádriceps en el grupo de inicio precoz, sin que esta mejora se acompañara de diferencias funcionales relevantes entre ambos grupos al final del seguimiento.

Forelli et al. (2023) observaron diferencias significativas a favor del grupo combinado OKC+CKC en comparación con el grupo CKC aislado. A los 3 meses, el LSI del cuádriceps fue del 76,14% en el grupo combinado frente al 46,91% en el grupo CKC, con una diferencia del 29,2% entre grupos ($p < 0,001$; Cohen $d = -1,3$). A los 6 meses, los valores fueron del 91,05% frente al 61,80%, respectivamente ($p < 0,001$; Cohen $d = -1,2$). En relación con los isquiotibiales, el LSI también fue superior en el grupo combinado, con valores del 86,13% frente al 64,26% a los 3 meses ($p < 0,001$) y del 91,90% frente al 82,42% a los 6 meses ($p = 0,024$). La relación PT/BW del cuádriceps mostró igualmente diferencias significativas a favor del grupo combinado, con valores de $1,81 \pm 0,75$ Nm/kg frente a $0,85 \pm 0,50$ Nm/kg a los 3 meses ($p < 0,001$).

Heijne y Werner (2007) analizaron la evolución de los torques musculares según el tipo de injerto y el momento de inicio de los ejercicios en OKC. Los resultados mostraron diferencias en la recuperación de la fuerza en función del injerto utilizado, especialmente entre los subgrupos con injerto rotuliano e injerto de isquiotibiales. En este estudio, el tipo de injerto pareció influir de forma relevante en la evolución de la fuerza muscular.

En conjunto, los estudios que evaluaron esta variable mostraron que el trabajo en OKC, ya sea de forma aislada o combinado con CKC, se asoció con mejoras relevantes en la fuerza del cuádriceps. Los resultados más favorables se observaron en los protocolos combinados, especialmente cuando se compararon con programas basados exclusivamente en CKC. La síntesis se recoge en la Tabla Anexo 5.

4.2.2. *Laxitud anterior de rodilla*

Cinco estudios evaluaron la laxitud anterior de rodilla mediante artrometría instrumentada. Los dispositivos empleados fueron el Knee Signature System, el KT-1000 arthrometer y el GNRB arthrometer. Esta variable fue especialmente relevante debido a la preocupación existente sobre el posible aumento de tensión sobre el injerto durante los ejercicios en OKC.

Pese a la diversidad de artrometros utilizados, todos ellos cuantifican la traslación tibial anterior en milímetros, lo que permite una comparación directa entre estudios. KT-1000 y GNRB, en particular, comparten un protocolo de fuerza aplicada similar que facilita esta comparación.

Morrissey et al. (2000) analizaron la laxitud anterior durante las primeras 6 semanas postoperatorias mediante el Knee Signature System. El grupo OKC presentó un aumento estimado del 9% respecto al grupo CKC; sin embargo, el intervalo de confianza fue amplio (-8% a $+29\%$) y la diferencia no alcanzó significación estadística.

Perry et al. (2005) evaluaron la laxitud durante las semanas 8 a 14 postoperatorias en 49 pacientes, utilizando también el Knee Signature System. Las mediciones se realizaron a 25° de flexión con una fuerza aplicada de 178 N. No se encontraron diferencias significativas entre los grupos OKC y CKC.

Fukuda et al. (2013) midieron la laxitud anterior mediante el KT-1000 arthrometer y compararon el inicio precoz del trabajo en OKC en un rango restringido de 45° a 90° con el inicio tardío en un rango de 0° a 90°. Los resultados no mostraron un aumento de la laxitud anterior asociado al inicio precoz del OKC cuando este fue aplicado en un rango articular controlado.

Forelli et al. (2023) evaluaron la laxitud mediante el GNRB arthrometer en 103 deportistas con injerto de isquiotibiales. La incorporación precoz de ejercicios en OKC dentro de un protocolo combinado OKC+CKC no produjo un aumento significativo de la laxitud en comparación con el grupo CKC. A los 3 meses, la laxitud fue de $0,38 \pm 1,19$ mm en el grupo intervención frente a $0,38 \pm 1,90$ mm en el grupo control ($p=0,98$). A los 6 meses, los valores fueron de $0,44 \pm 1,20$ mm frente a $0,58 \pm 1,65$ mm, respectivamente ($p=0,62$).

Heijne y Werner (2007) encontraron un resultado diferente al observado en la mayoría de los estudios. En su muestra de 68 pacientes, el subgrupo con injerto de isquiotibiales que inició el trabajo en OKC en la semana 4 (H4) presentó un aumento significativamente mayor de la laxitud anterior medida con KT-1000 en comparación con el subgrupo de inicio tardío (H12) y con el subgrupo de injerto rotuliano que inició OKC en la semana 4 (P4). Las mediciones se realizaron en el pretest y a los 3, 5 y 7 meses postoperatorios.

De forma global, cuatro de los cinco estudios que evaluaron la laxitud anterior no observaron aumentos significativos asociados al uso de ejercicios en OKC, especialmente cuando estos se aplicaron de forma progresiva, en rangos restringidos o dentro de protocolos combinados. El principal resultado contrario fue el de Heijne y Werner (2007), que señaló un posible aumento de laxitud en pacientes con injerto de isquiotibiales cuando el OKC se inició de forma temprana. La síntesis se recoge en la Tabla anexo 6.

4.2.3. Funcionalidad

Cinco estudios evaluaron la funcionalidad mediante la Lysholm Knee Scoring Scale, el Hughston Clinic Questionnaire, el single-legged hop test y el crossover hop test.

La escala Lysholm fue la herramienta común a cuatro de los cinco estudios, lo que permite la comparación cuantitativa directa de las puntuaciones funcionales. Los demás instrumentos aportan información complementaria, aunque no directamente equiparable.

Tres estudios no encontraron diferencias significativas entre OKC y CKC: Hooper et al. (2001) en variables biomecánicas de marcha y escaleras durante las primeras 6 semanas, Perry et al. (2005) mediante el Hughston Clinic Questionnaire en las semanas 8–14, y Fukuda et al. (2013) entre el inicio precoz y tardío del OKC. Por el contrario, Uçar et al. (2014) reportaron mejores puntuaciones Lysholm en el grupo CKC frente al OKC a los 6 meses postoperatorios, con diferencias estadísticamente significativas.

Khan et al. (2025) describieron la mayor mejora funcional en el grupo combinado OKC+CKC: la puntuación Lysholm pasó de $56,67 \pm 5,20$ a $97,50 \pm 2,15$ a las 16 semanas

(incremento del 72%), frente al 58% del grupo CKC (57,28 → 90,78) y al 63% del grupo OKC (56,22 → 91,67). Las diferencias entre el grupo combinado y los grupos aislados fueron significativas a partir de la sexta semana ($p < 0,001$), con un tamaño del efecto grande para el factor grupo (η^2 parcial = 0,321).

En síntesis, la mayoría de los estudios que compararon OKC y CKC de forma aislada no encontraron diferencias funcionales claras; los resultados favorables al CKC (37) o al protocolo combinado (30) se observaron principalmente mediante la escala Lysholm (Anexo 7).

4.2.4. Rango de movimiento

Cuatro estudios evaluaron el rango de movimiento de la rodilla mediante goniómetro universal o análisis biomecánico, midiendo principalmente la flexión y la extensión de rodilla.

El uso del goniómetro universal en la mayoría de los estudios permite la comparación directa de los grados de flexión y extensión obtenidos, expresados en una unidad de medida común.

Hooper et al. (2001) analizaron 17 variables biomecánicas durante las primeras 6 semanas postoperatorias, y solo una mostró diferencia significativa entre OKC y CKC (el ángulo de rodilla al inicio de la fase de apoyo durante la subida de escaleras), no considerada clínicamente relevante. Heijne y Werner (2007) no observaron diferencias claras entre los subgrupos analizados según el tipo de injerto y el momento de inicio del OKC. Uçar et al. (2014), por el contrario, describieron una mayor mejora de la flexión de rodilla en el grupo CKC frente al OKC a los 6 meses postoperatorios.

Khan et al. (2025) reportaron diferencias significativas a favor del grupo combinado OKC+CKC: el ROM aumentó de $25,22^\circ \pm 3,64$ a $140,61^\circ \pm 6,13$ (incremento del 90%), frente a $28,83^\circ \rightarrow 131,83^\circ$ en CKC (73%) y $26,83^\circ \rightarrow 129,22^\circ$ en OKC (72%). Las diferencias entre el grupo combinado y los grupos aislados fueron significativas a partir de la sexta semana ($p < 0,001$), con diferencias medias a las 16 semanas de $8,78^\circ$ frente a CKC y $11,39^\circ$ frente a OKC (η^2 parcial = 0,195).

En conjunto, los resultados sobre el ROM fueron heterogéneos: la mayoría de los estudios no observaron diferencias clínicamente relevantes entre OKC y CKC aisladas, mientras que los resultados favorables al CKC o al protocolo combinado se concentraron en Uçar et al. (2014) y Khan et al. (2025) (Anexo 8).

4.2.5. Dolor

Cinco estudios evaluaron el dolor mediante la escala VAS, la NPRS, el anterior knee pain score o preguntas específicas del Hughston Clinic Questionnaire.

La escala VAS, empleada por dos de los estudios, permitió la comparación directa de las puntuaciones de dolor. Los demás instrumentos, aunque válidos, ofrecen registros no directamente equiparables, lo que limita la comparación cuantitativa global pero no la interpretación cualitativa de las tendencias observadas.

Tres estudios no detectaron diferencias significativas entre OKC y CKC: Morrissey et al. (2002) en las semanas 2 a 6 (ambos grupos mostraron una reducción significativa pre-post en las preguntas 1, 2 y 25 del Hughston Clinic Questionnaire, $p < 0,01$), Fukuda et al. (2013) entre el inicio precoz y tardío del OKC a lo largo de 25 semanas, y Heijne y Werner (2007) entre los subgrupos según el injerto y el momento de inicio. Uçar et al. (2014), por su parte, reportaron una reducción del dolor significativamente mayor en el grupo CKC frente al OKC a los 3 y 6 meses (puntuaciones VAS más bajas en CKC en ambos momentos).

Khan et al. (2025) observaron la mayor reducción del dolor en el grupo combinado OKC+CKC: la puntuación VAS pasó de $70,61 \pm 7,56$ a $3,28 \pm 3,12$ a las 16 semanas (reducción del 95%), frente a una reducción del 86% en OKC ($70,44 \rightarrow 9,78$) y del 85% en CKC ($72,22 \rightarrow 10,56$). Las diferencias entre grupos fueron significativas a partir de la sexta semana ($p < 0,001$), con un tamaño del efecto grande (η^2 parcial = 0,319).

En conjunto, los resultados sobre el dolor no fueron homogéneos: algunos estudios no encontraron diferencias entre OKC y CKC, mientras que otros observaron mejores resultados con CKC (37) o con el protocolo combinado (30) (Anexo 9).

4.3. Síntesis global de los hallazgos

Los diez estudios incluidos analizaron el efecto de los ejercicios en cadena cinética abierta, cerrada y combinada tras la reconstrucción del ligamento cruzado anterior, mostrando resultados que variaron según la variable evaluada, el momento postoperatorio, el tipo de injerto y el protocolo aplicado.

De forma global, los resultados favorecieron al trabajo en OKC para la recuperación de la fuerza del cuádriceps, especialmente cuando se introdujo de forma precoz o se integró en un protocolo combinado. La laxitud anterior no aumentó de manera significativa con el uso de OKC en la mayoría de los estudios, salvo en el subgrupo con injerto de isquiotibiales y inicio precoz descrito por Heijne y Werner (2007). Para las variables clínicas (dolor, rango de movimiento y funcionalidad), los resultados fueron heterogéneos: algunos estudios no encontraron diferencias entre OKC y CKC aisladas, mientras que los resultados favorables se concentraron en el CKC (37) o en el protocolo combinado (30). La Tabla 3 presenta la matriz síntesis de estos hallazgos por modalidad y variable.

Tabla 3: Síntesis de los resultados por variables.

Variable	Nº estudios	Resultados con OKC aislado	Resultados con CKC aislado	Resultados con protocolo combinado	Hallazgo descriptivo principal
DOLOR	5/10	Reducción significativa pre-post; sin diferencias frente a CKC en 2 estudios	Reducción significativa; mayor que OKC en Uçar et al. (2014)	Mayor reducción que OKC y CKC en Khan et al. (2025)	Resultados heterogéneos entre estudios.
LAXITUD ANTERIOR	5/10	Sin aumento significativo en 4 de 5 estudios. Aumento en subgrupo H4 de Heijne y Werner (2007)	Sin aumento significativo de la laxitud	Sin aumento significativo de la laxitud (29)	Aumento de laxitud únicamente en injerto isquiotibial con inicio precoz (20).
FUERZA MUSCULAR	4/10	Ganancias superiores a CKC en Kang et al. (2012); recuperación más rápida con EOKC (33)	Mejoras pre-post en todos los estudios	LSI y PT/BW de los cuádriceps superiores a CKC en Forelli et al. (2023)	Resultados favorables a OKC y al protocolo combinado para la fuerza del cuádriceps.
ROM	4/10	Mejora similar a CKC en 2 estudios	Mayor mejora de la flexión que OKC en Uçar et al. (2014)	Mayor ganancia que OKC y CKC en Khan et al. (2025)	Resultados heterogéneos; diferencias en 2 de 4 estudios.
FUNCIONALIDAD	5/10	Sin diferencias frente a CKC en 3 de 5 estudios	Mejor Lysholm que OKC en Uçar et al. (2014)	Mejor Lysholm que OKC y CKC en Khan et al. (2025)	Diferencias mínimas en estudios aislados; resultados favorables al combinado en 1 estudio.

Fuentes: Elaboración propia.

Estos hallazgos descriptivos sugieren que ninguna modalidad resulta superior de forma absoluta, sino que cada una aporta beneficios específicos en función de la variable considerada y del contexto clínico del paciente. Sin embargo, la heterogeneidad observada entre los estudios limita la comparación directa entre protocolos y obliga a interpretar los resultados con prudencia. En el siguiente apartado se discuten estos hallazgos a la luz de la literatura previa, analizando las posibles explicaciones de las diferencias observadas, las implicaciones clínicas para la rehabilitación tras la reconstrucción del LCA y las limitaciones metodológicas que condicionan el alcance de las conclusiones.

5. DISCUSIÓN

5.1. Resumen de los principales hallazgos

La presente revisión sistemática tuvo como objetivo analizar los efectos de los ejercicios en cadena cinética abierta (OKC), cerrada (CKC) y combinada (OKC+CKC) sobre la fuerza muscular, la laxitud anterior, el dolor, el rango de movimiento (ROM) y la funcionalidad de la rodilla tras la reconstrucción del LCA. Tras analizar los diez estudios incluidos, los resultados

confirman la pregunta de investigación inicial: las tres modalidades producen mejoras clínicas, pero con efectos diferenciados según la variable considerada.

De forma global, el OKC se asoció a una recuperación más rápida y completa de la fuerza del cuádriceps, especialmente cuando se introdujo de forma precoz (33) o se combinó con CKC (29). El CKC mostró ventajas en la reducción del dolor y en la flexión de rodilla en algunos estudios (37). La laxitud anterior no aumentó de forma sistemática con el OKC, lo que cuestiona la creencia clínica histórica que desaconsejaba su uso temprano. Por último, los protocolos combinados (OKC+CKC) se posicionaron como la opción más completa, con resultados superiores en dolor, ROM, funcionalidad y fuerza (29,30). Estos hallazgos aportan información útil para individualizar la estrategia rehabilitadora.

5.2. Discusión de los resultados por variable

5.2.1. Fuerza y resistencia muscular

La recuperación de la fuerza del cuádriceps constituye uno de los principales retos tras la ACLR, ya que el déficit puede persistir durante meses o años y se asocia a un mayor riesgo de relesión (6,23). Los estudios analizados muestran una tendencia clara a favor del trabajo en OKC. Kang et al. (2012) demostraron que el OKC produjo mayores ganancias de fuerza isocinética y de resistencia muscular de los extensores que el CKC. Esta superioridad puede explicarse por el mayor aislamiento del cuádriceps durante el ejercicio OKC, que permite estímulos de carga más selectivos. En el CKC, en cambio, la activación coordinada de múltiples grupos musculares puede limitar la activación máxima del cuádriceps, especialmente cuando persiste la inhibición artrogénica (5).

Fukuda et al. (2013) añaden una dimensión temporal relevante: el inicio precoz del OKC en rango restringido facilitó una recuperación más rápida de la fuerza del cuádriceps frente al inicio tardío, lo que refuerza la idea de que el déficit precoz puede consolidarse si no se aborda con estímulos suficientes desde las primeras semanas. Los resultados más destacados provienen del estudio de Forelli et al. (2023), en el que el grupo combinado (OKC+CKC) alcanzó valores de LSI del cuádriceps próximos al umbral del 90 % recomendado para el retorno al deporte (17,38), mientras que el grupo CKC quedó claramente por debajo de este criterio. El protocolo combinado también mejoró la fuerza de los isquiotibiales, un aspecto crucial en la prevención de la relesión.

5.2.2. Laxitud anterior de rodilla

La laxitud anterior fue históricamente la principal preocupación que llevó a desaconsejar el uso del OKC en fases tempranas. La hipótesis biomecánica clásica sostiene que la contracción aislada del cuádriceps en cadena abierta genera una traslación tibial anterior que aumenta el

estrés sobre el injerto, especialmente entre los 38° y 10° de flexión (25). No obstante, los resultados de la presente revisión cuestionan parcialmente esta creencia: cuatro de los cinco estudios que evaluaron la laxitud no detectaron diferencias significativas entre OKC y CKC. Morrissey et al. (2000) ya señalaron en su trabajo que la preocupación clínica sobre la inseguridad del OKC temprano no estaba bien fundamentada. Perry et al. (2005) y Fukuda et al. (2013) confirmaron posteriormente que el OKC en rango restringido no aumenta la laxitud anterior. El estudio de Forelli et al. (2023), realizado con la artrometría automatizada más precisa disponible (GNRB), confirmó esta tendencia al no encontrar diferencias clínicamente relevantes entre el grupo combinado y el grupo CKC.

La excepción más importante la constituye el estudio de Heijne y Werner (2007), que detectaron un aumento significativo de la laxitud en el subgrupo con injerto de isquiotibiales y comienzo precoz del OKC. Este hallazgo sugiere que el tipo de injerto puede influir de forma decisiva en la respuesta biomecánica al ejercicio. Los injertos de isquiotibiales, a diferencia de los rotulianos, requieren un proceso de incorporación tendón-hueso más prolongado y podrían presentar una mayor susceptibilidad al estrés anterior durante las primeras semanas (18,19). En consecuencia, el OKC puede considerarse seguro en la mayoría de los pacientes, especialmente en rango restringido, pero requiere precaución en aquellos con injerto de isquiotibiales y una progresión más conservadora durante las primeras semanas postoperatorias.

5.2.3. Funcionalidad

La funcionalidad, evaluada principalmente con la escala Lysholm, mostró patrones mixtos. Los estudios que compararon OKC y CKC aisladas en fases tempranas e intermedias (26,33,35) no encontraron diferencias relevantes, lo que sugiere que ambas modalidades permiten una progresión funcional comparable cuando se aplican de forma aislada. No obstante, Uçar et al. (2014) describieron una mejor puntuación Lysholm en el grupo CKC a los 6 meses, y Khan et al. (2025) confirmaron que el protocolo combinado obtuvo la mejor recuperación funcional, con puntuaciones que superaron ampliamente la diferencia mínima clínicamente importante (MCID) estimada para la escala Lysholm en torno a 10 puntos en pacientes con patología de rodilla. Este dato es relevante porque indica que la superioridad del protocolo combinado no es solo estadística, sino también clínicamente perceptible para el paciente.

La interpretación de los resultados funcionales debe realizarse, sin embargo, con cierta cautela. La escala Lysholm es una medida autoinformada y, por tanto, puede estar influida por factores no relacionados directamente con el ejercicio, como la edad, el nivel deportivo previo, las características del injerto, la presencia de lesiones asociadas o los aspectos psicológicos relacionados con el retorno a la actividad (39,40). Esta limitación puede explicar parte de la variabilidad observada entre los estudios incluidos.

5.2.4. Rango de movimiento (ROM)

Los resultados sobre el ROM fueron menos consistentes. Hooper et al. (2001) no encontraron diferencias clínicamente relevantes entre OKC y CKC en las primeras semanas postoperatorias, lo que sugiere que ambas modalidades favorecen una recuperación similar de la movilidad articular en fase precoz. En la fase intermedia y tardía, sin embargo, Uçar et al. (2014) reportaron ventajas para el CKC en flexión, y Khan et al. (2025) describieron resultados claramente favorables al protocolo combinado, con una ganancia de flexión superior a la observada en los grupos aislados. Este resultado puede explicarse por la complementariedad de ambas modalidades: el CKC favorece la flexión funcional en cadena cerrada, próxima a los gestos cotidianos como subir escaleras, mientras que el OKC permite trabajar la flexión más allá de los rangos soportables en carga, especialmente cuando se ejecuta en rangos articulares específicos como el utilizado en el protocolo de Khan et al. (2025).

5.2.5. Dolor

Los estudios analizados mostraron una reducción progresiva del dolor postoperatorio tanto con CKC como con OKC, sin que ninguna modalidad demuestre superioridad sistemática. Morrissey et al. (2002) y Fukuda et al. (2013) no detectaron diferencias entre grupos, lo que sugiere que ambos tipos de ejercicio resultan igualmente bien tolerados en las primeras fases de la rehabilitación. Este hallazgo desmonta la idea de que el OKC genera necesariamente más dolor anterior por mayor estrés sobre el mecanismo extensor. Sin embargo, Uçar et al. (2014) reportaron una mayor reducción del dolor en el grupo CKC a los 3 y 6 meses, y Khan et al. (2025) mostraron que el protocolo combinado obtuvo la mayor reducción del dolor al final del seguimiento. Estas diferencias podrían explicarse por la mayor carga axial controlada del CKC y por el efecto sinérgico de combinar ambas modalidades en rangos articulares específicos. La heterogeneidad de los instrumentos de medida (VAS, NPRS, anterior knee pain score, Hughston Clinic Questionnaire) dificulta, no obstante, una comparación directa entre estudios.

5.3. Factores moduladores de los resultados

Más allá del análisis por variable, dos factores transversales condicionan la interpretación de los hallazgos: el momento de introducción del OKC y el tipo de injerto utilizado.

En primer lugar, el timing de introducción del OKC ha evolucionado considerablemente. Las recomendaciones clásicas postergaban su uso hasta las semanas 12–16 por temor a un aumento de la laxitud del injerto. Sin embargo, los estudios de Fukuda et al. (2013) y Forelli et al. (2023) muestran que el inicio precoz, desde la cuarta semana postoperatoria, es seguro cuando se respetan ciertos límites de rango articular. Este cambio de paradigma resulta coherente con la evidencia biomecánica reciente, según la cual la activación del cuádriceps en flexión superior a 60° genera un estrés mínimo sobre el LCA (25,34,38). La superación de la

creencia clásica sobre la peligrosidad del OKC precoz supone una de las aportaciones más relevantes de los estudios recientes incluidos en esta revisión.

En segundo lugar, el tipo de injerto influye claramente en la respuesta al ejercicio. El injerto rotuliano (hueso-tendón-hueso) presenta una integración ósea más rápida, mientras que el injerto de isquiotibiales requiere una incorporación tendón-hueso más prolongada, durante la cual puede ser más vulnerable a las cargas tibiales anteriores generadas por el OKC (20). Esta consideración es especialmente importante en la práctica actual, donde el injerto de isquiotibiales se utiliza con frecuencia por su menor morbilidad en la zona donante (18).

La integración de estos dos factores conduce a una conclusión clave de la presente revisión: los protocolos combinados (OKC+CKC) tienden a ofrecer los mejores resultados globales. Khan et al. (2025) demostraron la superioridad del combinado en dolor, ROM y funcionalidad, y Forelli et al. (2023) confirmaron este patrón en relación con la fuerza muscular sin comprometer la seguridad del injerto. Esta superioridad puede explicarse por la complementariedad biomecánica entre ambas modalidades: el CKC aporta beneficios funcionales (control neuromuscular, integración del miembro inferior) próximos a las actividades de la vida diaria, mientras que el OKC permite estímulos analíticos sobre los cuádriceps difícilmente alcanzables en cadena cerrada. Este enfoque integrador refuerza la tendencia actual hacia la individualización del tratamiento, alejándose del debate dicotómico “OKC vs CKC”.

5.4. Comparación con la literatura previa

Los resultados de la presente revisión son coherentes con los de revisiones sistemáticas y metaanálisis previos. Pamboris et al. (2024) confirmaron la equivalencia funcional entre OKC y CKC aisladas y señalaron además la baja calidad metodológica de muchos estudios incluidos en este campo, una limitación que también se observa en la presente revisión. Perriman et al. (2018), en un metaanálisis sobre laxitud, fuerza y función, no demostraron superioridad clara de una modalidad sobre la otra y subrayaron la seguridad del OKC en rangos articulares controlados, una conclusión que coincide plenamente con los hallazgos del presente trabajo. Tagesson et al. (2008) también describieron resultados comparables entre OKC y CKC en la traslación tibial dinámica, apoyando la equivalencia entre ambas modalidades cuando se aplican de forma controlada. Andersson et al. (2009), en su evaluación de los ensayos clínicos aleatorizados sobre rehabilitación post-ACLR, ya señalaban la heterogeneidad de los protocolos como una de las principales limitaciones del campo, una observación que sigue siendo válida más de quince años después.

La presente revisión aporta, sin embargo, dos elementos diferenciales respecto a estas revisiones previas. En primer lugar, la inclusión de estudios recientes con protocolos combinados (29,30) permite analizar una tercera opción terapéutica que no había sido suficientemente evaluada en las revisiones anteriores, las cuales se centraban casi exclusivamente en la comparación dicotómica OKC vs CKC. En segundo lugar, el análisis específico del impacto del

tipo de injerto sobre la respuesta al OKC (20) introduce un matiz clínicamente relevante que rara vez se aborda de forma sistemática en las revisiones generales, y que resulta especialmente pertinente dada la creciente utilización del injerto de isquiotibiales en la práctica actual (18).

5.5. Aplicación clínica

Los hallazgos permiten formular recomendaciones organizadas según la fase de rehabilitación. Como se ha analizado en el apartado anterior (5.3), el tipo de injerto y el momento de introducción del OKC son dos factores clave que deben guiar las decisiones terapéuticas en cada fase. En la fase precoz (0–6 semanas postoperatorias), el CKC debería constituir la base del programa, ya que ofrece mayor seguridad articular y favorece la reactivación neuromuscular en patrones funcionales. La introducción del OKC puede considerarse a partir de la cuarta semana, limitándola a un rango restringido (45° – 90°) y con progresión cuidadosa. En pacientes con injerto de isquiotibiales, el inicio del OKC debería postergarse o restringirse aún más para minimizar el riesgo de aumento de la laxitud (20).

En la fase intermedia (6–14 semanas), el protocolo combinado se posiciona como la opción más completa: la integración de ejercicios OKC (leg extension, leg curl, isocinético) junto con los CKC habituales (sentadillas, lunges, leg press) optimiza simultáneamente la fuerza, el ROM y la funcionalidad. Esta fase es crítica para evitar la consolidación de déficits de fuerza del cuádriceps. En la fase tardía (>14 semanas), el énfasis debe ponerse en la transferencia funcional y en la preparación para el retorno deportivo, con monitorización objetiva de la simetría entre extremidades (LSI, hop tests). Más allá de estas pautas generales, la individualización del tratamiento sigue siendo esencial: el tipo de injerto, la edad, el nivel deportivo previo y la presencia de lesiones asociadas deben orientar las decisiones terapéuticas en cada caso.

5.6. Limitaciones de la revisión

La presente revisión presenta varias limitaciones. En primer lugar, la calidad metodológica de los estudios incluidos fue heterogénea: tres estudios (29,30,33) alcanzaron una calidad alta ($\geq 7/10$ en la escala PEDro y 7/9 NOS), mientras que dos obtuvieron 4/10 (26,34). Estos últimos fueron incluidos por su relevancia clínica y temática, pero sus resultados deben interpretarse con cautela. En segundo lugar, existe una considerable heterogeneidad entre estudios en relación con las poblaciones (edad, sexo, nivel deportivo, tipo de injerto), las intervenciones (duración, frecuencia, ejercicios), los tiempos de seguimiento (de 4 semanas a 17 meses) y los instrumentos de medida (KT-1000, GNRB, Knee Signature System; VAS, NPRS, Hughston; Lysholm, IKDC, hop tests), lo que dificulta la comparación directa y limita la posibilidad de un metaanálisis cuantitativo.

En tercer lugar, la representatividad de los protocolos combinados es limitada, ya que solo dos estudios (29,30) los evaluaron de forma directa. Además, Khan et al. único trabajo que

comparó directamente OKC, CKC y protocolo combinado, no evaluó la laxitud anterior ni la fuerza muscular, por lo que sus conclusiones favorables al combinado deben interpretarse con cautela. En cuarto lugar, varios estudios incluidos son antiguos (26,28,34), lo que puede limitar la aplicabilidad de sus resultados a las prácticas quirúrgicas y rehabilitadoras actuales. Finalmente, el número limitado de estudios incluidos (n=10) y la búsqueda en solo tres bases de datos (PubMed, PEDro, Cochrane) pueden haber reducido la exhaustividad de la revisión.

5.7. Perspectivas y futuras líneas de investigación

Se necesitan ensayos clínicos aleatorizados de alta calidad metodológica que comparen directamente protocolos combinados frente a OKC y CKC aisladas, evaluando simultáneamente las cinco variables analizadas. El estudio de Khan et al. (30) constituye un buen punto de partida, pero su tamaño muestral (n=54) limita la generalización. Sería igualmente relevante analizar de forma sistemática el efecto del tipo de injerto, incluyendo el injerto cuadricepsal, cada vez más utilizado. Por último, el seguimiento a largo plazo (>12 meses) está poco representado en los estudios actuales: convendría evaluar si los efectos diferenciales se mantienen a medio y largo plazo, especialmente en relación con la prevención de la artrosis postraumática y la reincidencia de lesiones del LCA.

6. CONCLUSIÓN

La presente revisión sistemática tuvo como objetivo analizar los efectos de los ejercicios en cadena cinética abierta (OKC), cerrada (CKC) y combinada (OKC+CKC) sobre la fuerza muscular, la laxitud anterior, el dolor, el rango de movimiento y la funcionalidad de la rodilla tras la reconstrucción del ligamento cruzado anterior. Tras analizar los diez estudios incluidos, se observan en los resultados que las tres modalidades producen mejoras clínicas relevantes en los pacientes, aunque con efectos diferenciados según la variable considerada.

En relación con la fuerza del cuádriceps, los ejercicios en cadena cinética abierta se asocian a una recuperación más rápida y completa, especialmente cuando se introducen de forma precoz dentro de un rango articular restringido o se integran en un protocolo combinado. Respecto a la laxitud anterior, la evidencia analizada cuestiona la creencia clínica histórica que desaconsejaba el uso temprano del OKC: cuando se aplica de manera controlada, no se observa un aumento clínicamente relevante de la laxitud del injerto, salvo en los pacientes con injerto de isquiotibiales, en los que se recomienda una progresión más conservadora. En cuanto al dolor, al rango de movimiento y a la funcionalidad, los protocolos combinados (OKC+CKC) se han posicionado como la opción más completa, ofreciendo resultados superiores a las modalidades aisladas.

Desde una perspectiva clínica, estos hallazgos sugieren que el debate tradicional “OKC frente a CKC” debería superarse a favor de un enfoque integrador, en el que ambas modalidades

se combinen de forma progresiva e individualizada según la fase de rehabilitación, el tipo de injerto, los objetivos terapéuticos y la respuesta clínica del paciente. La cadena cinética cerrada aporta un trabajo funcional próximo a las actividades de la vida diaria, mientras que la cadena cinética abierta permite un estímulo más específico sobre el mecanismo extensor, difícilmente alcanzable en carga.

No obstante, la heterogeneidad metodológica de los estudios incluidos, la diversidad de protocolos y de instrumentos de medida, así como el número limitado de ensayos disponibles, obligan a interpretar estas conclusiones con prudencia. Resulta necesario el desarrollo de ensayos clínicos aleatorizados de mayor calidad metodológica que comparen directamente las tres modalidades, evaluando simultáneamente las cinco variables analizadas y considerando el tipo de injerto utilizado.

En conjunto, la presente revisión refuerza la idea de que la rehabilitación tras la reconstrucción del LCA debe construirse sobre criterios objetivos y una progresión individualizada, donde la combinación adecuada de ejercicios en cadena cinética abierta y cerrada constituye, con la evidencia actualmente disponible, la estrategia más completa para optimizar la recuperación funcional del paciente.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Petersen W, Zantop T. Anatomy of the Anterior Cruciate Ligament with Regard to Its Two Bundles: Clin Orthop. enero de 2007;454:35-47. doi:10.1097/BLO.0b013e31802b4a59
2. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Paterno MV, Quatman CE. Mechanisms, prediction, and prevention of ACL injuries: Cut risk with three sharpened and validated tools. J Orthop Res. noviembre de 2016;34(11):1843-55. doi:10.1002/jor.23414
3. Quatman CE, Quatman-Yates CC, Hewett TE. A 'Plane' Explanation of Anterior Cruciate Ligament Injury Mechanisms: A Systematic Review. Sports Med. septiembre de 2010;40(9):729-46. doi:10.2165/11534950-000000000-00000
4. Smith TO, Postle K, Penny F, McNamara I, Mann CJV. Is reconstruction the best management strategy for anterior cruciate ligament rupture? A systematic review and meta-analysis comparing anterior cruciate ligament reconstruction versus non-operative treatment. The Knee. marzo de 2014;21(2):462-70. doi:10.1016/j.knee.2013.10.009
5. 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. marzo de 2019;53(5):289-98. doi:10.1136/bjsports-2017-098401
6. Tayfur B, Charupongsang C, Morrissey D, Miller SC. Neuromuscular Function of the Knee Joint Following Knee Injuries: Does It Ever Get Back to Normal? A Systematic Review with Meta-Analyses. Sports Med. febrero de 2021;51(2):321-38. doi:10.1007/s40279-020-01386-6
7. Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Garrett WE. Mechanisms of Anterior Cruciate Ligament Injury. Orthopedics. junio de 2000;23(6):573-8. doi:10.3928/0147-7447-20000601-15
8. Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, Bahr R, Beynon BD, DeMaio M, et al. Understanding and Preventing Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries: A Review of the Hunt Valley II Meeting, January 2005. Am J Sports Med. septiembre de 2006;34(9):1512-32. doi:10.1177/0363546506286866
9. Joseph AM, Collins CL, Henke NM, Yard EE, Fields SK, Comstock RD. A Multisport Epidemiologic Comparison of Anterior Cruciate Ligament Injuries in High School Athletics. J Athl Train. 1 de diciembre de 2013;48(6):810-7. doi:10.4085/1062-6050-48.6.03
10. Montalvo AM, Schneider DK, Webster KE, Yut L, Galloway MT, Heidt RS, et al. Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Sport: A Systematic Review and Meta-Analysis of Injury Incidence by Sex and Sport Classification. J Athl Train. 1 de mayo de 2019;54(5):472-82. doi:10.4085/1062-6050-407-16
11. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: Part 1, Mechanisms and Risk Factors. Am J Sports Med. febrero de 2006;34(2):299-311. doi:10.1177/0363546505284183

12. Sutton KM, Bullock JM. Anterior Cruciate Ligament Rupture: Differences Between Males and Females. *J Am Acad Orthop Surg.* 1 de enero de 2013;21(1):41-50. doi:10.5435/JAAOS-21-01-41
13. Abram SGF, Price AJ, Judge A, Beard DJ. Anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction and meniscal repair rates have both increased in the past 20 years in England: hospital statistics from 1997 to 2017. *Br J Sports Med.* marzo de 2020;54(5):286-91. doi:10.1136/bjsports-2018-100195
14. Zbrojkiewicz D, Vertullo C, Grayson JE. Increasing rates of anterior cruciate ligament reconstruction in young Australians, 2000–2015. *Med J Aust.* mayo de 2018;208(8):354-8. doi:10.5694/mja17.00974
15. Filbay SR, Grindem H. Evidence-based recommendations for the management of anterior cruciate ligament (ACL) rupture. *Best Pract Res Clin Rheumatol.* febrero de 2019;33(1):33-47. doi:10.1016/j.berh.2019.01.018
16. Filbay SR, Roos EM, Frobell RB, Roemer F, Ranstam J, Lohmander LS. Delaying ACL reconstruction and treating with exercise therapy alone may alter prognostic factors for 5-year outcome: an exploratory analysis of the KANON trial. *Br J Sports Med.* noviembre de 2017;51(22):1622-9. doi:10.1136/bjsports-2016-097124
17. Rambaud AJM, Ardern CL, Thoreux P, Regnaud JP, Edouard P. Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction: a scoping review. *Br J Sports Med.* noviembre de 2018;52(22):1437-44. doi:10.1136/bjsports-2017-098602
18. Mouarbes D, Menetrey J, Marot V, Courtot L, Berard E, Cavaignac E. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis of Outcomes for Quadriceps Tendon Autograft Versus Bone–Patellar Tendon–Bone and Hamstring–Tendon Autografts. *Am J Sports Med.* diciembre de 2019;47(14):3531-40. doi:10.1177/0363546518825340
19. Saueressig T, Braun T, Steglich N, Diemer F, Zebisch J, Herbst M, et al. Primary surgery versus primary rehabilitation for treating anterior cruciate ligament injuries: a living systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* noviembre de 2022;56(21):1241-51. doi:10.1136/bjsports-2021-105359
20. Heijne A, Werner S. Early versus late start of open kinetic chain quadriceps exercises after ACL reconstruction with patellar tendon or hamstring grafts: a prospective randomized outcome study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* abril de 2007;15(4):402-14. doi:10.1007/s00167-006-0246-z
21. Van Grinsven S, Van Cingel REH, Holla CJM, Van Loon CJM. Evidence-based rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* agosto de 2010;18(8):1128-44. doi:10.1007/s00167-009-1027-2
22. Culvenor AG, Girdwood MA, Juhl CB, Patterson BE, Haberfield MJ, Holm PM, et al. Rehabilitation after anterior cruciate ligament and meniscal injuries: a best-evidence synthesis of systematic reviews for the OPTIKNEE consensus. *Br J Sports Med.* diciembre de 2022;56(24):1445-53. doi:10.1136/bjsports-2022-105495

23. Lepley LK. Deficits in Quadriceps Strength and Patient-Oriented Outcomes at Return to Activity After ACL Reconstruction: A Review of the Current Literature. *Sports Health Multidiscip Approach*. mayo de 2015;7(3):231-8. doi:10.1177/1941738115578112
24. Perriman A, Leahy E, Semciw AI. The Effect of Open- Versus Closed-Kinetic-Chain Exercises on Anterior Tibial Laxity, Strength, and Function Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Orthop Sports Phys Ther*. julio de 2018;48(7):552-66. doi:10.2519/jospt.2018.7656
25. Wilk KE, Escamilla RF, Fleisig GS, Barrentine SW, Andrews JR, Boyd ML. A Comparison of Tibiofemoral Joint Forces and Electromyographic Activity During Open and Closed Kinetic Chain Exercises. *Am J Sports Med*. julio de 1996;24(4):518-27. doi:10.1177/036354659602400418
26. Hooper DM, Morrissey MC, Drechsler W, Morrissey D, King J. Open and Closed Kinetic Chain Exercises in the Early Period after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Improvements in Level Walking, Stair Ascent, and Stair Descent. *Am J Sports Med*. marzo de 2001;29(2):167-74. doi:10.1177/03635465010290020901
27. Pamboris GM, Pavlou K, Paraskevopoulos E, Mohagheghi AA. Effect of open vs. closed kinetic chain exercises in ACL rehabilitation on knee joint pain, laxity, extensor muscles strength, and function: a systematic review with meta-analysis. *Front Sports Act Living*. 3 de junio de 2024;6:1416690. doi:10.3389/fspor.2024.1416690
28. Mikkelsen C, Werner S, Eriksson E. Closed kinetic chain alone compared to combined open and closed kinetic chain exercises for quadriceps strengthening after anterior cruciate ligament reconstruction with respect to return to sports: a prospective matched follow-up study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. noviembre de 2000;8(6):337-42. doi:10.1007/s001670000143
29. Forelli F, Barbar W, Kersante G, Vandebrouck A, Duffiet P, Ratte L, et al. Evaluation of Muscle Strength and Graft Laxity With Early Open Kinetic Chain Exercise After ACL Reconstruction: A Cohort Study. *Orthop J Sports Med*. 1 de junio de 2023;11(6):23259671231177594. doi:10.1177/23259671231177594
30. Khan D, Ahmad A, Karimi H, Hanif A, Almansour A, Almansour A, et al. Effect of Knee Angle Specific (60°–90°) Combine versus Isolated Kinetic Chain on Post ACL Recovery Outcomes: A Randomized Control Trial. *J Multidiscip Healthc*. septiembre de 2025;Volume 18:5801-15. doi:10.2147/JMDH.S528778
31. Andersson D, Samuelsson K, Karlsson J. Treatment of Anterior Cruciate Ligament Injuries With Special Reference to Surgical Technique and Rehabilitation: An Assessment of Randomized Controlled Trials. *Arthroscopy*. junio de 2009;25(6):653-85. doi:10.1016/j.arthro.2009.04.066
32. Tagesson S, Öberg B, Good L, Kvist J. A Comprehensive Rehabilitation Program with Quadriceps Strengthening in Closed versus Open Kinetic Chain Exercise in Patients with Anterior Cruciate Ligament Deficiency: A Randomized Clinical Trial Evaluating Dynamic Tibial Translation and Muscle Function. *Am J Sports Med*. febrero de 2008;36(2):298-307. doi:10.1177/0363546507307867
33. Fukuda TY, Fingerhut D, Moreira VC, Camarini PMF, Scodeller NF, Duarte A, et al. Open Kinetic Chain Exercises in a Restricted Range of Motion After Anterior Cruciate Ligament

- Reconstruction: A Randomized Controlled Clinical Trial. *Am J Sports Med.* abril de 2013;41(4):788-94. doi:10.1177/0363546513476482
34. Morrissey MC, Hudson ZL, Drechsler WI, Csoutts FJ, Knight PR, King JB. Effects of open versus closed kinetic chain training on knee laxity in the early period after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* noviembre de 2000;8(6):343-8. doi:10.1007/s001670000161
 35. Perry MC, Morrissey MC, King JB, Morrissey D, Earnshaw P. Effects of closed versus open kinetic chain knee extensor resistance training on knee laxity and leg function in patients during the 8- to 14-week post-operative period after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* julio de 2005;13(5):357-69. doi:10.1007/s00167-004-0568-7
 36. Kang S, Jeon H, Kwon O, Cynn H, Choi B. Effect of open kinetic chain exercise versus closed kinetic chain exercise on isokinetic strength and endurance of knee extensors of patients after anterior cruciate ligament reconstruction. *Physical therapy korea.* 2012;69-77.
 37. Uçar M, Koca I, Eroglu M, Eroglu S, Sarp U, Arik HO, et al. Evaluation of Open and Closed Kinetic Chain Exercises in Rehabilitation Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Phys Ther Sci.* 2014;26(12):1875-8. doi:10.1589/jpts.26.1875
 38. Morrissey MC, Drechsler WI, Morrissey D, Knight PR, Armstrong PW, McAuliffe TB. Effects of distally fixated versus nondistally fixated leg extensor resistance training on knee pain in the early period after anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther.* enero de 2002;82(1):35-43. doi:10.1093/ptj/82.1.35 PubMed PMID: 11784276.
 39. Filbay SR, Ackerman IN, Russell TG, Macri EM, Crossley KM. Health-Related Quality of Life After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Am J Sports Med.* mayo de 2014;42(5):1247-55. doi:10.1177/0363546513512774
 40. Filbay SR, Culvenor AG, Ackerman IN, Russell TG, Crossley KM. Quality of life in anterior cruciate ligament-deficient individuals: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* agosto de 2015;49(16):1033-41. doi:10.1136/bjsports-2015-094864

8. ANEXOS

Anexo 1: Escala de Evaluación de la Calidad metodológica PEDro.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Nota
Morrissey et al. (2000)	Sí	Sí	No	No	No	No	Sí	No	No	Sí	Sí	4/10
Hooper et al. (2001)	Sí	Sí	No	Sí	No	No	No	No	No	Sí	Sí	4/10
Morrissey et al. (2002)	Sí	Sí	No	Sí	No	No	Sí	No	No	Sí	Sí	5/10
Perry et al. (2005)	Sí	Sí	No	Sí	No	No	Sí	No	No	Sí	Sí	5/10
Heijne et al. (2007)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	No	No	Sí	Sí	6/10
Kang et al. (2012)	Sí	Sí	No	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	6/10
Fukuda et al. (2013)	No	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	8/10
Uçar et al. (2014)	No	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	No	Sí	Sí	6/10
Khan et al. (2025)	Sí	Sí	No	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	7/10
1. Criterios de elección 2. Asignación aleatoria 3. Ocultación de la asignación 4. Grupos homogéneos al inicio 5. Cegamiento de participantes 6. Cegamiento de terapeutas 7. Cegamiento de evaluadores 8. Seguimiento adecuado 9. Análisis por intención de tratar 10. Comparación entre grupos 11. Variabilidad y estimaciones puntuales Calidad alta: $\geq 7/10$ puntos Calidad moderada: 4-6/10 puntos Calidad baja: $\leq 3/10$ puntos												

Fuente: Elaboración propia a partir de la Escala PEDro (Physiotherapy Evidence Database).

Puntuación final: 1 punto por criterios cumplido

Anexo 2: Lista de verificación PRISMA 2020

Sección	Ítem	Criterio	Página
Título	1	Identificar el informe como revisión sistemática	Portada
Resumen	2	Resumen estructurado con antecedentes, objetivos, métodos, resultados y conclusiones	1
Introducción	3	Justificación: por qué es necesaria la revisión	8-9
	4	Objetivos claramente formulados	10
Métodos	5	Protocolo de registro (si existe)	N/A
	6	Criterios de elegibilidad	12
	7	Fuentes de información (bases de datos y fechas de búsqueda)	11
	8	Estrategia de búsqueda completa para al menos una base de datos	13
	9	Proceso de selección de estudios	14
	10	Proceso de extracción de datos	15-17
	11	Lista de datos extraídos de cada estudio	18-23
	12	Evaluación del riesgo de sesgo / calidad metodológica	14-15
	13	Medidas de efecto y síntesis de resultados	19-22
	14	Métodos para síntesis cuantitativa (metaanálisis)	N/A
	15	Métodos para investigar sesgos de publicación	N/A
	16	Métodos para análisis de subgrupos	N/A
Resultados	17	Resultados de la búsqueda y diagrama de flujo PRISMA	14
	18	Características de los estudios incluidos	18
	19	Riesgo de sesgo / calidad metodológica de los estudios incluidos	14-15
	20	Resultados de estudios individuales	19-22
	21	Resultados de síntesis	23
	22	Sesgos de publicación	N/A
	23	Certeza de la evidencia	29-30
Discusión	24	Interpretación de los resultados	24-30
	25	Limitaciones	29-30
	26	Conclusiones	30-31
Información adicional	27	Financiación y conflicto de intereses	Declarado en el texto (sin financiación ni conflicto de intereses)

Fuente: Elaboración propia basada en la declaración PRISMA 2020.

N/A: no aplicable

Anexo 3: Evaluación de la calidad metodológica del estudio de Forelli et al. (2023) mediante la escala Newcastle-Ottawa (NOS).

Dominio	Ítem evaluado	Criterio NOS	Resultado en el estudio	Estrellas
SELECCIÓN	1. Representatividad de la cohorte expuesta	Cohorte realmente representativa / Representativa de manera parcial / Grupo seleccionado / No descrito	Deportistas recreativos con injerto de isquiotibiales (ST/G), Tegner ≥6 y Marx ≥6, <35 años, IMC <30 kg/m². Población clínicamente relevante pero específica.	★
	2. Selección de la cohorte no expuesta	Mismo origen comunitario / Origen distinto / No descrito	Grupo intervención procedente de un único centro (Clinique de Domont); grupo control reclutado en otros centros de rehabilitación.	—
	3. Determinación de la exposición	Registro seguro (historia clínica) / Entrevista estructurada / Autoinforme escrito / No descrito	Protocolos de rehabilitación documentados y supervisados por cuatro fisioterapeutas experimentados, con seguimiento de las cargas y dosificaciones.	★
	4. Ausencia del outcome al inicio del estudio	Sí / No	Todos los participantes eran pacientes post-ACLR con déficits de fuerza esperados al inicio del periodo de seguimiento.	★
COMPARABILIDAD	5. Comparabilidad de las cohortes (diseño o análisis)	Control del factor más importante (★) / Control de factores adicionales (★)	Apareamiento explícito por sexo, edad, talla, peso, IMC, escala Tegner y escala Marx. La Tabla 1 del estudio confirma la ausencia de diferencias significativas entre grupos en todas estas variables.	★★
OUTCOME	6. Evaluación del outcome	Evaluación ciega independiente / Registro objetivo / Autoinforme / No descrito	Instrumentos objetivos estandarizados (dinamometría isocinética, artrómetro GNRB a 134 N). Sin cegamiento formal de los evaluadores (limitación reconocida por los autores).	★
	7. Duración del seguimiento suficiente	Sí (especificar duración) / No	Evaluaciones a 3 y 6 meses postoperatorios, periodo adecuado para valorar la recuperación de la fuerza y la estabilidad del injerto.	★
	8. Adecuación del seguimiento de las cohortes	Seguimiento completo / Pérdidas improbables / Pérdidas sin descripción / Sin descripción	Seguimiento completo de ambos grupos en los dos tiempos de medida (n=51 vs n=52).	★
TOTAL		Calidad metodológica ALTA		7/9

Interpretación NOS: Calidad alta (7–9 estrellas) · Calidad moderada (4–6 estrellas) · Calidad baja (0–3 estrellas).

Fuente: Elaboración propia a partir de Wells GA, Shea B, O'Connell D, et al. The Newcastle-Ottawa Scale (NOS) for assessing the quality of nonrandomised studies in meta-analyses. Ottawa Hospital Research Institute.

Anexo 4: Tabla resultados

Autor / Año	Calidad PEDro	Tipo de intervención	N.º de participantes	Duración / Frecuencia	Escalas / Instrumentos	Resultados principales	Relevancia para mi estudio
Khan et al., 2025	7/10	3 grupos: A) CKC B) OKC C) OKC + CKC (combinado) Trabajo en rango 60°–90°	n = 54 (18 por grupo) Edad: 18–50 años Injerto: no especificado	60 min/sesión 3 veces/semana Duración: 16 semanas Evaluaciones: pre, semana 6 y semana 16	Escala de dolor (VAS/NPRS) Goniómetro (ROM) Escala funcional de rodilla	Mejoría significativa en los 3 grupos para dolor, ROM y función. Grupo combinado (OKC+CKC): mayor reducción del dolor a las 16 sem. ROM en flexión: 28,83° → 140,61° en el grupo combinado. Mejor puntuación funcional final en el grupo combinado. Diferencias significativas a favor del protocolo combinado.	Único estudio que compara directamente CKC, OKC y combinado. Aporta el argumento más sólido a favor del protocolo combinado. Refuerza la conclusión central del TFG: la combinación CKC+OKC sería la estrategia más completa para dolor, ROM y función.
Forelli et al., 2023	4/10	Estudio cohortes Grupo control: CKC aislado Grupo intervención: CKC + OKC precoz (OKC isocinético cuádriceps + isquiotibiales)	n = 103 deportistas recreativos CKC: n = 52 OKC+CKC: n = 51 Edad media: 30,1 ± 9,3 años Injerto: isquiotibiales (ST/G)	3 sesiones/semana OKC añadido desde la semana 4 postoperatoria Evaluaciones: 3 y 6 meses	Dinamómetro isocinético (PT/BW y LSI) Artrómetro GNRB (laxitud, 134 N) Escala Tegner y Marx	LSI cuádriceps: +29,2 % a favor del combinado (3 y 6 meses; p<0,001). LSI isquiotibiales: 86,1 % vs 64,3 % a 3 m (p<0,001); 91,9 % vs 82,4 % a 6 m (p=0,024). PT/BW cuádriceps: 1,81 vs 0,85 Nm/kg a 3 m (p<0,001). Laxitud GNRB: sin diferencias significativas (3 m: 0,38 vs 0,38 mm; 6 m: 0,44 vs 0,58 mm; p>0,05). Tamaños del efecto grandes (Cohen d ≈ -1,2 a -1,3) para fuerza.	Estudio clave para la variable FUERZA: demuestra que añadir OKC precoz al CKC mejora claramente la fuerza de cuádriceps e isquiotibiales. Aporta evidencia directa sobre la SEGURIDAD del OKC precoz con injerto de isquiotibiales (sin aumento de laxitud). Muestra mayor (n=103) y diseño con datos cuantitativos sólidos: muy útil para la discusión y para la defensa del protocolo combinado.
Heijne et Werner, 2007	6/10	Inicio precoz vs tardío de OKC según tipo de injerto 4 subgrupos: P4 / P12 (rotuliano) H4 / H12 (isquiotibiales)	n = 68 36 hombres, 32 mujeres 34 con injerto rotuliano (P) 34 con injerto de isquiotibiales (H)	Inicio OKC: semana 4 (precoz) o semana 12 (tardío) Seguimiento: pre, 3, 5 y 7 meses postoperatorios	Artrómetro KT-1000 (laxitud) Dinamometría isocinética (torque máximo cuádriceps) Goniómetro universal (ROM) Anterior knee pain score	Subgrupo H4 (isquiotibiales + OKC precoz): aumento significativo de laxitud anterior vs H12 y P4. Inicio precoz seguro con injerto rotuliano (P4 sin aumento de laxitud). Recuperación de la fuerza variable según tipo de injerto, más que según timing. Sin diferencias claras en ROM ni en dolor anterior entre subgrupos.	Estudio fundamental para matizar la conclusión del TFG: muestra que el OKC precoz NO es seguro en todos los casos. Justifica la recomendación clínica de individualizar el inicio de OKC según el tipo de injerto. Es el principal contraejemplo en la variable laxitud → aporta equilibrio crítico a la revisión.

Autor / Año	Calidad PEDro	Tipo de intervención	N.º de participantes	Duración / Frecuencia	Escalas / Instrumentos	Resultados principales	Relevancia para mi estudio
Fukuda et al., 2013	NOS: 7/9	Inicio precoz (EOKC) vs tardío (LOKC) del OKC Protocolo común de rehabilitación + extensión de rodilla en OKC	n = 49 EOKC: n = 25 LOKC: n = 24 Edad: 16–50 años Injerto: semitendinoso y grácil	Protocolo total: 25 semanas EOKC: semana 4 (rango 45°–90°) LOKC: semana 12 (rango 0°–90°)	Cuestionarios de dolor Pruebas isocinéticas (fuerza cuádriceps) Artrómetro KT-1000 (laxitud) Escalas funcionales	Sin aumento de laxitud anterior con OKC precoz en rango restringido (45°–90°). EOKC: recuperación más rápida de la fuerza del cuádriceps. Sin diferencias entre grupos para dolor. Sin diferencias relevantes en ROM.	Demuestra la seguridad del OKC precoz cuando se aplica en rango articular controlado. Apoya la introducción temprana del OKC para acelerar la recuperación de la fuerza del cuádriceps. Calidad metodológica alta (PEDro 8/10) → estudio de referencia para fuerza y laxitud en el TFG.
Uçar et al., 2014	6/10	CKC vs OKC (asignación por sobres sellados) Mismo programa postoperatorio general CKC: sentadillas, wall sits, step-ups OKC: isométricos, isotónicos, leg press on/off	n = 58 Grupo CKC: n = 30 Grupo OKC: n = 28 Injerto: no especificado	Evaluaciones: preoperatoria, 3 meses y 6 meses postoperatorios	VAS (dolor) Goniómetro (ROM) Escala de Lysholm (función)	Mejoría pre-post significativa en ambos grupos. Dolor: mayor reducción en CKC a 3 y 6 meses ($p < 0,05$). ROM: mayor ganancia de flexión en CKC. Lysholm: puntuación significativamente más alta en CKC a los 6 meses.	Estudio clave a favor del CKC para dolor, función y flexión de rodilla. Equilibra la balanza frente a estudios que destacan al OKC para fuerza. Refuerza la idea de que el CKC ofrece ventajas funcionales clínicamente relevantes en el seguimiento de medio plazo.
Kang et al., 2012	6/10	OKC vs CKC OKC: SLR, leg extension, leg curl CKC: squat, leg press, lunge	n = 36 (tras exclusiones) Injerto: no especificado	30 min/sesión 3 veces/semana 12 semanas	Dinamómetro isocinético (60°/s, rango 0°–90°) Fuerza y resistencia de extensores de rodilla	Ambos grupos mejoraron significativamente. OKC: mayores ganancias en fuerza isocinética y resistencia muscular del cuádriceps. Diferencias significativas a favor del OKC para fuerza de extensores.	Sustenta la afirmación del TFG de que el OKC es superior al CKC para la recuperación de la FUERZA del cuádriceps. Aporta evidencia cuantitativa con dinamometría isocinética. Útil en la discusión sobre la complementariedad CKC + OKC.
Perry et al., 2005	5/10	OKC vs CKC Entrenamiento de extensores de rodilla y cadera en fase media de rehabilitación	n = 49 37 hombres, 12 mujeres Edad media: 33 años Injerto: no especificado	Semanas 8–14 postoperatorias 3 sesiones/semana	Knee Signature System (laxitud, 25° flexión, 178 N) Pruebas funcionales de la pierna	Sin diferencias significativas en laxitud entre OKC y CKC. Sin diferencias significativas en función de la pierna en la fase media. Ambas modalidades produjeron una recuperación funcional comparable.	Apoya la SEGURIDAD del OKC en fase intermedia (semanas 8–14). Refuerza la idea de equivalencia entre OKC y CKC en fase media para laxitud y función. Útil para acotar los efectos según el momento postoperatorio.
Morrissey et al., 2002	5/10	OKC vs CKC Entrenamiento de extensores de rodilla y cadera dentro del programa formal de fisioterapia	n = 43 34 hombres, 9 mujeres Edad media: 29 años Injerto: no especificado	3 veces/semana Evaluaciones: semanas 2 y 6 postoperatorias	VAS (dolor anterior) Hughston Clinic Questionnaire (preguntas 1, 2 y 25) Contracciones isométricas máximas	Reducción significativa del dolor pre-post en ambos grupos. Sin diferencias significativas entre OKC y CKC para el dolor anterior ($p > 0,05$).	Demuestra que el OKC NO incrementa el dolor anterior frente al CKC en fase precoz. Apoya la seguridad clínica del OKC en las primeras semanas.

Autor / Año	Calidad PEDro	Tipo de intervención	N.º de participantes	Duración / Frecuencia	Escalas / Instrumentos	Resultados principales	Relevancia para mi estudio
						Efecto similar de ambas modalidades en el dolor anterior temprano.	Es una de las referencias clave en la sección de la variable DOLOR.
Hooper et al., 2001	4/10	CKC vs OKC en fase postoperatoria temprana CKC: leg press unilateral OKC: ejercicios aislados de extensores de cadera y rodilla	n = 37 CKC: n = 18 OKC: n = 19 Injerto: no especificado	4 semanas de rehabilitación 3 sesiones/semana	Análisis de la marcha en llano Análisis subida y bajada de escaleras	Solo una variable de la marcha mostró diferencia significativa entre grupos. Resto de medidas: sin diferencias relevantes entre OKC y CKC. Sin diferencias clínicamente relevantes en la mejoría funcional temprana.	Apoya la equivalencia funcional de OKC y CKC en fase temprana. Limitada calidad metodológica (PEDro 4/10) → se cita pero con cautela en la discusión. Útil para mostrar la heterogeneidad de los protocolos en fase precoz.
Morrissey et al., 2000	4/10	OKC vs CKC Entrenamiento de extensores de rodilla y cadera en cadena abierta o cerrada	n = 36 29 hombres, 7 mujeres Edad media: 30 años Injerto : no especificado	3 veces/semana 4 semanas Evaluaciones: semanas 2 y 6	Knee Signature System (laxitud anterior)	Aumento estimado de la laxitud en OKC ~9 % (IC: -8 % a +29 %). Diferencia NO significativa entre grupos. El IC amplio limita las conclusiones.	Estudio histórico que cuestiona la antigua contraindicación absoluta del OKC en fase precoz. Aunque la calidad metodológica es limitada (PEDro 4/10), su aporte conceptual es importante. Útil para describir la evolución de la evidencia sobre la seguridad del OKC.

Fuente: Elaboración propia basada en los datos extraídos de Khan et al. (2025), Forelli et al. (2023), Heijne et al. (2007), Fukuda et al. (2013), Uçar et al. (2014), Kang et al. (2012), Perry et al. (2005), Morrissey et al. (2002), Hooper et al. (2001) y Morrissey et al. (2000).

Anexo 5: Tabla de la variable: fuerza y resistencia.

Autor / Año	Instrumento de medida	Resultados grupo OKC	Resultados grupo CKC	Grupo combinado	Diferencia significativa	Conclusión
Kang et al., 2012	Dinamómetro isocinético (60°/s, rango 0-90°)	Mayores ganancias en fuerza isocinética y resistencia	Mejora significativa pero menor	No evaluado	Sí a favor de OKC	OKC superior a CKC para fuerza y resistencia de extensores.
Fukuda et al., 2013	Pruebas isocinéticas	EOKC: recuperación más rápida de la fuerza	LOKC: recuperación más lenta	No evaluado	Sí a favor de EOKC	OKC precoz favorece la recuperación de la fuerza del cuádriceps.
Heijne et Werner, 2007	Dinamometría isocinética	P4 y H4: torques variables según injerto	P12 y H12: torques variables según injerto	No evaluado	Sí según tipo de injerto	El tipo de injerto influyó más en la fuerza que el momento de inicio.
Forelli et al., 2023	Dinamómetro isocinético (PT/BW y LSI)	No aplicable (grupo sólo CKC)	Mejora estándar	OKC+CKC: mayor fuerza de cuádriceps e isquiotibiales a 3 y 6 meses	Sí a favor del combinado	OKC añadido al CKC mejoró la fuerza sin riesgo añadido para el injerto.

Fuente: Elaboración propia basada en los datos extraídos de Kang et al. (2012), Fukuda et al. (2013), Heijne et al. (2007) y Forelli et al. (2023).

Anexo 6: Tabla de la variable: Laxitud anterior de la rodilla

Autor / Año	Instrumento de medida	Resultados grupo OKC	Resultados grupo CKC	Grupo combinado	Diferencia significativa	Conclusión
Morrissey et al., 2000	Knee Signature System	Aumento estimado ~9% (IC: -8% a +29%)	Sin aumento relevante	No evaluado	NO concluyente (IC amplio)	No apoya una contraindicación clara del OKC temprano por laxitud.
Perry et al., 2005	Knee Signature System (25° flexión, 178 N)	Sin aumento relevante	Sin aumento relevante	No evaluado	NO entre grupos	OKC y CKC fueron comparables en laxitud (semanas 8-14).
Heijne et Werner, 2007	KT-1000 arthrometer	H4: aumento significativo de laxitud P4: sin aumento	Referencia	No evaluado	Sí en injerto de isquiotibiales	El inicio precoz del OKC con injerto de isquiotibiales aumentó la laxitud.
Fukuda et al., 2013	KT-1000 arthrometer	EOKC (45-90°): sin aumento de laxitud	LOKC: sin aumento de laxitud	No evaluado	NO entre grupos	OKC precoz en rango restringido (45-90°) no aumentó la laxitud.
Forelli et al., 2023	GNRB arthrometer	No aplicable (grupo sólo CKC)	Referencia	OKC+CKC: sin aumento significativo de laxitud	NO entre grupos	Añadir OKC precoz a CKC no comprometió la laxitud del injerto.

Fuente: Elaboración propia basada en los datos extraídos de Morrissey et al. (2000), Fukuda et al. (2013), Perry et al. (2005), Heijne et al. (2007) y Forelli et al. (2023).

Anexo 7: Tabla de la variable: Funcionalidad

Autor / Año	Instrumento de medida	Resultados grupo OKC	Resultados grupo CKC	Grupo combinado	Diferencia significativa	Conclusión
Hooper et al., 2001	Análisis biomecánico de la marcha y escaleras	Mejora general	Mejora general	No evaluado	NO clínicamente relevante	Sin diferencias clínicamente relevantes en la función temprana.
Perry et al., 2005	Hughston Clinic Questionnaire + tests funcionales (saltos)	Sin diferencias funcionales	Sin diferencias funcionales	No evaluado	NO entre grupos	OKC y CKC comparables en función de la pierna en fase intermedia.
Fukuda et al., 2013	Cuestionarios de función	Mejora general	Mejora general	No evaluado	NO entre grupos	Sin diferencias funcionales entre EOKC y LOKC.
Uçar et al., 2014	Lysholm Knee Scoring Scale	Mejora significativa	Mejor puntuación Lysholm a 6 meses	No evaluado	Sí a favor de CKC	CKC mostró mejor funcionalidad medida por Lysholm.
Khan et al., 2025	Lysholm Knee Scoring Scale	Mejora (56,28 → ~91)	Mejora (56,28 → ~91)	Mayor mejoría (56,28 → 97,50)	Sí a favor del combinado	El protocolo combinado obtuvo la mejor puntuación funcional.

Fuente: Elaboración propia basada en los datos extraídos de Hooper et al. (2001), Fukuda et al. (2013), Uçar et al. (2014), Perry y al. (2005) y Khan et al. (2025).

Anexo 8: Tabla de la variable: ROM

Autor / Año	Instrumento de medida	Resultados grupo OKC	Resultados grupo CKC	Grupo combinado	Diferencia significativa	Conclusión
Hooper et al., 2001	Análisis de la marcha y escaleras	Mejora general	Mejora general	No evaluado	NO clínicamente relevante	Solo una variable de la marcha mostró diferencia; sin diferencias relevantes.
Heijne et Werner, 2007	Goniómetro universal	Mejora similar entre grupos	Mejora similar entre grupos	No evaluado	NO claras	No hubo diferencias claras en ROM según timing del OKC.
Uçar et al., 2014	Goniómetro universal	Mejora moderada en flexión	Mayor mejora de la flexión de rodilla	No evaluado	Sí a favor de CKC	CKC mostró mayor mejoría de la flexión de rodilla.
Khan et al., 2025	Goniómetro	Mejora significativa (31,15° → 42,05° en extensión)	Mejora significativa	Mayor ganancia de ROM (28,83° → 140,61° en flexión)	Sí a favor del combinado	El protocolo combinado obtuvo la mayor ganancia de ROM.

Fuente: Elaboración propia basada en los datos extraídos de Hooper et al. (2001), Uçar et al. (2014), Heijne et al. (2007) y Khan et al. (2025).

Anexo 9: Tabla de la variable: Dolor

Autor / Año	Instrumento de medida	Resultados grupo OKC	Resultados grupo CKC	Grupo combinado	Diferencia significativa	Conclusión
Morrissey et al., 2002	VAS y Hughston Clinic Questionnaire (preguntas 1, 2 y 25)	Reducción significativa pre-post	Reducción significativa pre-post	No evaluado	NO entre grupos ($p>0,05$)	OKC y CKC tienen efectos similares sobre el dolor anterior temprano.
Fukuda et al., 2013	Cuestionarios de dolor	Mejora progresiva	Mejora progresiva	No evaluado	NO entre grupos	Sin diferencias entre OKC precoz vs tardío sobre el dolor.
Uçar et al., 2014	VAS	Mejora significativa	Mayor reducción del dolor	No evaluado	Sí a favor de CKC (3 y 6 meses)	CKC mostró reducción del dolor superior a OKC.
Heijne et Werner, 2007	Anterior knee pain score	Sin aumento del dolor anterior	Sin aumento del dolor anterior	No evaluado	NO claras	No hubo diferencias claras en dolor anterior según timing del OKC.
Khan et al., 2025	Escalas de dolor	Mejora significativa	Mejora significativa	Mayor reducción al final del seguimiento	Sí a favor del combinado	El protocolo combinado obtuvo la mayor reducción del dolor.

Fuente: Elaboración propia basada en los datos extraídos de Morrissey et al. (2002), Fukuda et al. (2013), Uçar et al. (2014), Heijne et al. (2007) y Khan et al. (2025).