



**MAGÍSTER EN EVALUACIÓN Y PLANIFICACIÓN
DEL ENTRENAMIENTO DEPORTIVO**

**Validación de un dispositivo con IMU para medir fuerza y
potencia en levantamientos olímpicos en Cross Training**

Autor

Franco Ariel Jorquera Pezoa

Profesor Guía: Cristian Cofré

12 de enero de 2025

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la validez concurrente, concordancia y confiabilidad de un dispositivo con Unidad de Medición Inercial (IMU) anclado a la barra para cuantificar variables cinemáticas y cinéticas durante los levantamientos olímpicos snatch y clean & jerk en atletas avanzados de Cross Training. Se desarrolló una investigación cuantitativa, no experimental y transversal, con la participación de diez atletas ($n = 10$) que ejecutaron ambos levantamientos a intensidades del 60 %, 80 % y 90 % del 1RM bajo condiciones simuladas de competencia.

Las mediciones obtenidas mediante el sistema IMU fueron comparadas con una plataforma de fuerza AMTI OR6-7 como método de referencia. Se analizaron variables de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico mediante correlaciones de Pearson, regresión lineal, análisis de Bland–Altman, coeficientes de correlación intraclase (ICC) y ANOVA de medidas repetidas.

Los resultados mostraron relaciones lineales moderadas a altas entre el IMU y el método de referencia para aceleración, fuerza y velocidad pico, mientras que la potencia pico presentó una validez concurrente más limitada, especialmente en el clean & jerk. El análisis de concordancia evidenció una leve sobreestimación sistemática del IMU, con límites de acuerdo aceptables para las variables cinemáticas y mayor variabilidad en la potencia. La confiabilidad del dispositivo fue excelente ($ICC = 0.84–0.93$), sin diferencias significativas en la precisión entre intensidades.

En conclusión, el IMU evaluado constituye una herramienta válida, confiable y funcional para el monitoreo de aceleración, fuerza y velocidad en levantamientos olímpicos en Cross Training, mientras que la estimación de la potencia debe interpretarse con cautela y puede beneficiarse de procesos adicionales de calibración.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
2.1. Pregunta de investigación	10
¿Qué nivel de validez y confiabilidad presenta un dispositivo anclado a la barra con IMU para cuantificar la fuerza y la potencia en snatch y clean & jerk en atletas de Cross Training bajo condiciones simuladas de competencia?	10
2.2. Objetivos	10
2.2.1. Objetivo general.....	10
2.2.2. Objetivos específicos	10
2.3. Hipótesis	10
2.4.1. Hipótesis de Trabajo	10
2.4.2. Hipótesis Alterna.....	11
2.4.3. Hipótesis Nula	11
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1 Fundamentos de la Fuerza y Potencia en Levantamientos Olímpicos.....	12
3.2 Importancia del Snatch y el Clean & Jerk en Cross Training.....	12
3.3 Métodos Tradicionales de Medición de Fuerza y Potencia	13
3.4 Tecnología de Sensores Inerciales (IMU) como Alternativa	15
3.5 Evidencia Reciente sobre Validación de IMUs en Deportes de Fuerza	15
3.6 Necesidad de Innovación en Medición para el Cross Training.....	16
3.7. Caracterización de las Competencias de Cross Training.....	17
3.8. Evaluación de la carga externa e interna en el entrenamiento deportivo	18
3.9. Síntesis Integrativa	19
4. METODOLOGÍA.....	20
4.3. Variables conceptuales y operacionales	22
5. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS	27
6. DISCUSIÓN.....	44
6.1. Validez concurrente del IMU en levantamientos olímpicos.....	44

6.2. Concordancia entre IMU y plataforma de fuerza	45
6.3. Confiabilidad del IMU en diferentes intensidades	46
6.4. Efecto del porcentaje de carga en la precisión del IMU.....	46
6.5. Relevancia práctica de los resultados.....	47
6.6. Limitaciones del estudio	47
6.7. Aplicación de los resultados a la planificación del entrenamiento en Cross Training.....	48
6.8. Alcance del tratamiento estadístico	49
7. CONCLUSIONES.....	50
8. AMPLIACIÓN ÉTICA	52
REFERENCIAS	53
ANEXOS.....	59
ANEXO A. Consentimiento Informado	60
ANEXO B. Tabla de mediciones de snatch al 60, 80 y 90%.....	64
ANEXO C. Tabla de mediciones de Clean & Jerk al 60, 80 y 90%.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejecución de snatch.	13
Figura 2. Ejecución de clean & jerk.	13
Figura 3. Ejemplos de plataformas comúnmente utilizadas para la medición de fuerza y potencia. Plataforma de fuerza AMI OR6-7, procesamiento cinemático y dinámico Vicon Nexus (basado en cámara) y transductor lineal (encoder) GymAware, de izquierda a derecha.	14
Figura 4. Representaciones de IMU, la cual tiene capacidad de medir aceleración lineal, orientación y dirección de la gravedad.	15
Figura 5. Dispositivo VmaxPro basado en IMU que se ancla a la barra.	16
Figura 6. Boxplots resumen de aceleración, fuerza, velocidad y potencia pico para el ejercicio de snatch, considerando todos los participantes y los tres niveles de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM). Se comparan las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza y el sistema IMU.	31
Figura 7. Boxplots resumen de aceleración, fuerza, velocidad y potencia pico para el ejercicio de clean & jerk, considerando todos los participantes y los tres niveles de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM). Se comparan las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza y el sistema IMU.	32
Figura 8. Validez concurrente entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de <i>snatch</i> . Relación lineal entre las mediciones de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico, incluyendo recta de regresión, intervalo de confianza del 95 % y línea de identidad.	33
Figura 9. Validez concurrente entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de clean & jerk. Relación lineal entre las mediciones de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico, incluyendo recta de regresión, intervalo de confianza del 95 % y línea de identidad.	34
Figura 10. Mapa de calor de los coeficientes de correlación entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para las variables de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en el ejercicio de <i>snatch</i>	36

Figura 11. Mapa de calor de los coeficientes de correlación entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para las variables de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en el ejercicio de <i>clean & jerk</i>	36
Figura 12. Análisis de Bland–Altman entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de snatch. Diferencia IMU–plataforma en función de la media de ambos métodos para aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico. Se muestran el sesgo medio (línea continua) y los límites de acuerdo al 95 % (líneas discontinuas).....	37
Figura 13. Análisis de Bland–Altman entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de clean & jerk. Diferencia IMU–plataforma en función de la media de ambos métodos para aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico. Se muestran el sesgo medio (línea continua) y los límites de acuerdo al 95 % (líneas discontinuas).....	38
Figura 14. Tendencias biomecánicas por intensidad para el ejercicio de snatch. Valores medios ($\pm$ desviación estándar) de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en función del porcentaje de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM), comparando las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza (REF) y sistema IMU.	40
Figura 15. Tendencias biomecánicas por intensidad para el ejercicio de clean & jerk. Valores medios ($\pm$ desviación estándar) de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en función del porcentaje de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM), comparando las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza (REF) y sistema IMU.	41

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el Cross Training ha adquirido un notable auge como modalidad de acondicionamiento físico, combinando ejercicios de alta intensidad y movimientos funcionales para el desarrollo integral de la fuerza, la potencia y la resistencia (Barranco-Ruiz et al., 2020). Dentro de esta disciplina, la halterofilia, especialmente a través del snatch (arranque) y el clean & jerk (envión), se consolida como una de las herramientas más efectivas para mejorar el rendimiento neuromuscular y la explosividad (Comfort et al., 2023; Mohamad et al., 2021). Estos levantamientos, de origen olímpico, requieren un alto nivel de coordinación, técnica depurada y un reclutamiento eficiente de las grandes masas musculares, lo que explica su implementación en diversos programas de entrenamiento y su popularidad creciente (Mashchenko et al., 2021; Zaras et al., 2020).

La eficacia del snatch y del clean & jerk radica en su capacidad para entrenar la fuerza máxima, la rapidez y la potencia de manera simultánea, factores que resultan determinantes en el rendimiento competitivo de numerosas disciplinas deportivas (Soares et al., 2024; Huebner et al., 2022). Sin embargo, la cuantificación precisa de variables como la fuerza pico, la potencia pico, o la velocidad de la barra durante estos movimientos ha estado tradicionalmente supeditada a la disponibilidad de sistemas de medición costosos, como las plataformas de fuerza y los sistemas ópticos de captura de movimiento (Nagao & Yamashita, 2022; Hofman-Bang et al., 2021). Esta limitación tecnológica dificulta el monitoreo frecuente de los atletas y la recolección de datos en entornos reales de entrenamiento o en contextos de competencia, donde la retroalimentación inmediata podría marcar la diferencia en la toma de decisiones (Krzyszowski, 2022; Mack, 2022).

La llegada de tecnologías portátiles, como las Unidades de Medición Inercial (IMU), ha abierto nuevas posibilidades para la evaluación de la técnica y el rendimiento sin perturbar significativamente el flujo natural del entrenamiento (Ang & Kong, 2023; Tumurbaatar et al., 2021). Estos sensores permiten registrar la aceleración, la velocidad y la trayectoria del movimiento, posibilitando la obtención de métricas de fuerza y potencia con un costo de implementación ostensiblemente menor al de los sistemas tradicionales (Khuyagbaatar et al., 2024; Rethinam et al., 2023). Además, su fácil instalación en la propia barra –como un seguro

o accesorio adicional– ofrece la ventaja de que el atleta no deba modificar su rutina ni su técnica de ejecución de manera sustancial (Mohamad et al., 2021; Comfort et al., 2023).

En este contexto, el presente estudio describe el diseño y la validación de un dispositivo con IMU fijado a la barra de halterofilia. Su finalidad es cuantificar la fuerza y la potencia ejercidas durante el snatch y el clean & jerk en escenarios de Cross Training. Este desarrollo se justifica por la necesidad de disponer de herramientas objetivas y accesibles que contribuyan al perfeccionamiento técnico y a la optimización de la carga de entrenamiento (Viafora et al., 2024; Soares et al., 2024). El estudio se centra, particularmente, en el “Centro Lautaro” ubicado en Viña del Mar, Chile, donde atletas de nivel avanzado requieren mediciones fiables y continuas para alcanzar su máximo rendimiento sin que la medición interfiera con la dinámica usual de su práctica deportiva (Mashchenko et al., 2021; Zaras et al., 2020).

En el contexto del Cross Training competitivo, la evaluación instrumental del rendimiento no constituye un fin en sí mismo, sino un medio para apoyar la toma de decisiones en la planificación y programación del entrenamiento deportivo. La disponibilidad de indicadores objetivos de carga externa adquiere relevancia únicamente cuando estos pueden ser interpretados e integrados dentro de un sistema de evaluación que considere la dosificación del estímulo, el control de la fatiga y la optimización de las adaptaciones a corto y largo plazo. En este sentido, la validación del dispositivo basado en IMU se enmarca como un componente dentro de un proceso sistemático de evaluación del entrenamiento, orientado a mejorar la calidad de la planificación, resguardar el bienestar del deportista y optimizar el rendimiento en contextos reales de práctica deportiva.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La importancia de desarrollar fuerza y potencia mediante los movimientos de halterofilia en entornos de Cross Training es indiscutible. Sin embargo, la obtención de métricas precisas (fuerza pico, potencia pico, velocidad de la barra) está limitada por la disponibilidad de equipos costosos y complejos (Barranco-Ruiz et al., 2020; Viafora et al., 2024). Dicha barrera tecnológica dificulta la realización de evaluaciones permanentes en condiciones reales de entrenamiento y competencia (Zaras et al., 2020).

En el Centro Lautaro de Viña del Mar, donde existen atletas que se entrenan a un nivel avanzado, por lo que surge la necesidad de una solución portable, fiable y de menor costo económico, que permita recopilar información objetiva sobre la ejecución de los levantamientos, similar a lo presentado en Comfort et al (2023). El uso de un dispositivo anclado a la barra que incorpore una IMU ofrece ventajas considerables: su instalación no interfiere significativamente en la técnica, los datos pueden recogerse en tiempo real y la versatilidad del dispositivo lo hace útil en entornos competitivos (Khuyagbaatar et al., 2024; Hofman-Bang et al., 2021).

Bajo este contexto, el presente estudio se justifica en la búsqueda de herramientas que permitan la evaluación objetiva y continua de la fuerza y la potencia durante los movimientos de snatch y clean & jerk. Así, el objetivo es diseñar, construir y validar un prototipo de dispositivo que cumpla con estos requisitos, contribuyendo a:

- Optimizar el monitoreo del rendimiento en snatch y clean & jerk (Nagao & Yamashita, 2022).
- Facilitar la toma de decisiones en la planificación del entrenamiento, al disponer de datos reales de la ejecución en condiciones de alta exigencia (Soares et al., 2024).
- Ampliar el acceso a instrumentos de medición portátiles y confiables, permitiendo el avance continuo de la práctica de Cross Training y sus deportistas (Tumurbaatar et al., 2021).

Más allá de la precisión instrumental, en el Cross Training existe una dificultad concreta para integrar mediciones objetivas de carga externa dentro de procesos sistemáticos de evaluación del entrenamiento. En la práctica cotidiana, entrenadores y atletas suelen carecer de criterios operativos claros que permitan interpretar variables mecánicas como fuerza, velocidad y potencia en función de la planificación, el control de la fatiga y la progresión de la carga. Esta brecha entre medición y toma de decisiones limita el potencial impacto de las tecnologías de monitoreo en la optimización del rendimiento deportivo, particularmente en disciplinas caracterizadas por una alta variabilidad de estímulos y exigencias competitivas.

2.1. Pregunta de investigación

A partir de la problemática descrita, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué nivel de validez y confiabilidad presenta un dispositivo anclado a la barra con IMU para cuantificar la fuerza y la potencia en snatch y clean & jerk en atletas de Cross Training bajo condiciones simuladas de competencia?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Validar un dispositivo anclado a la barra con IMU que cuantifique la fuerza y la potencia durante snatch y clean & jerk en atletas de Cross Training de nivel avanzado del Centro Lautaro en Viña del Mar, Chile, bajo condiciones simuladas de competencia.

2.2.2. Objetivos específicos

- 1) Implementar el dispositivo con IMU anclado a la barra de halterofilia para la recolección de datos de aceleración lineal y velocidad angular durante la ejecución de snatch y clean & jerk en condiciones simuladas de competencia.
- 2) Aplicar un protocolo de medición sincronizada que registre simultáneamente las señales del IMU, de una plataforma de fuerza y de un sistema óptico de captura, garantizando comparabilidad de las mediciones de fuerza y potencia.
- 3) Analizar la concordancia y el sesgo entre las mediciones de fuerza y potencia obtenidas con el IMU y las de los métodos de referencia, empleando coeficientes de correlación de Pearson, diagramas de Bland–Altman y coeficientes de correlación intraclase (ICC).

2.3. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis de Trabajo

El dispositivo anclado a la barra con IMU proporcionará mediciones de fuerza con un alto grado de correlación ($r \geq 0.80$; $p = 0.05$) respecto a la carga total levantada, bajo condiciones simuladas de competencia en atletas de Cross Training de nivel avanzado del Centro Lautaro.

2.4.2. Hipótesis Alterna

El dispositivo anclado a la barra con IMU proporcionará mediciones de potencia con un alto grado de correlación ($r \geq 0.80$; $p = 0.05$) respecto a la carga total levantada, bajo condiciones simuladas de competencia en atletas de Cross Training de nivel avanzado del Centro Lautaro.

2.4.3. Hipótesis Nula

El dispositivo anclado a la barra con IMU no muestra relación con mediciones de fuerza y potencia, comparado con la carga total levantada en snatch y clean & jerk, bajo condiciones simuladas de competencia.

3. MARCO TEÓRICO

La presente sección tiene por objetivo establecer los fundamentos conceptuales y científicos que respaldan la necesidad de validar un dispositivo basado en tecnología inercial para la medición de fuerza y potencia en levantamientos olímpicos, específicamente en el contexto del Cross Training. Para ello, se revisarán los conceptos de fuerza y potencia como capacidades físicas fundamentales, la relevancia de los movimientos de snatch y clean & jerk dentro del entrenamiento funcional, las limitaciones de los métodos tradicionales de medición biomecánica, y el surgimiento de tecnologías portátiles como las unidades de medición inercial (IMU). Asimismo, se abordará la evidencia reciente sobre la validez de estas tecnologías en deportes de fuerza, y se justificará la importancia de innovar en las estrategias de evaluación en entornos dinámicos y de alta exigencia como el Cross Training.

3.1 Fundamentos de la Fuerza y Potencia en Levantamientos Olímpicos

La fuerza y la potencia son capacidades fundamentales en el desarrollo del rendimiento deportivo, particularmente en disciplinas que involucran movimientos explosivos como los levantamientos olímpicos. La fuerza puede definirse como la capacidad del sistema neuromuscular para generar tensión contra una resistencia, mientras que la potencia se refiere a la cantidad de trabajo realizado en un tiempo determinado, siendo el producto de la fuerza aplicada por la velocidad del movimiento (Macías et al., 2024).

En ejercicios como el snatch y el clean & jerk, se requiere una combinación óptima de fuerza máxima, velocidad de ejecución y coordinación intermuscular para movilizar la barra de manera eficiente. Estas habilidades no solo son críticas para el rendimiento en halterofilia, sino que también se transfieren a múltiples disciplinas deportivas que demandan acciones de alta velocidad y fuerza explosiva (Zaras et al., 2020).

3.2 Importancia del Snatch y el Clean & Jerk en Cross Training

El Cross Training incorpora los levantamientos olímpicos como parte esencial de su programación debido a su capacidad para desarrollar fuerza, potencia, movilidad y control corporal. El snatch y el clean & jerk representan ejercicios complejos que integran múltiples cadenas musculares y requieren una elevada competencia técnica para su ejecución eficiente (Ver Fig. 1 y 2).



Figura 1. Ejecución de snatch.



Figura 2. Ejecución de clean & jerk.

Estos movimientos permiten mejorar la capacidad de generación de fuerza en cortos períodos de tiempo, aumentando así la potencia global del atleta. Además, su inclusión sistemática en el Cross Training favorece la mejora del rendimiento cardiovascular, la estabilidad del core, la flexibilidad articular y la resistencia muscular, componentes todos ellos esenciales para afrontar la variabilidad de los estímulos presentes en esta disciplina (Mashchenko et al., 2021).

3.3 Métodos Tradicionales de Medición de Fuerza y Potencia

Tradicionalmente, la cuantificación precisa de variables como la fuerza, la potencia y la velocidad en levantamientos ha requerido equipamiento especializado de laboratorio. Entre los principales métodos se destacan:

- **Plataformas de fuerza:** permiten medir la fuerza de reacción del suelo en tres dimensiones, proporcionando datos de impulso, potencia y distribución de cargas. Son consideradas el estándar de referencia para mediciones dinámicas de fuerza externa.
- **Sistemas ópticos de captura de movimiento:** mediante el uso de cámaras de alta velocidad y marcadores reflectantes, permiten analizar de forma tridimensional la trayectoria y cinemática de los segmentos corporales y de la barra.
- **Transductores lineales de posición:** miden el desplazamiento de la barra a través de cables extensibles, calculando velocidad y aceleración lineal con alta precisión.

Entre los métodos tradicionales (ver algunos ejemplos en Fig. 3) destacan las plataformas de fuerza, como las AMTI OR6-7 usada en Agar-Newmann et al. (2025) o las Bertec FP4060-10 usadas en experimentos de Jirovska et al. (2023), que permiten registrar fuerzas de reacción tridimensionales. Asimismo, los sistemas ópticos de captura de movimiento, como el Vicon Nexus o el Qualisys Oqus (Barzyk et al., 2024), posibilitan el análisis cinemático detallado. Finalmente, transductores lineales como el GymAware PowerTool o el Tendo Unit son ampliamente utilizados para medir la velocidad de desplazamiento de la barra (Kissick et al., 2025).

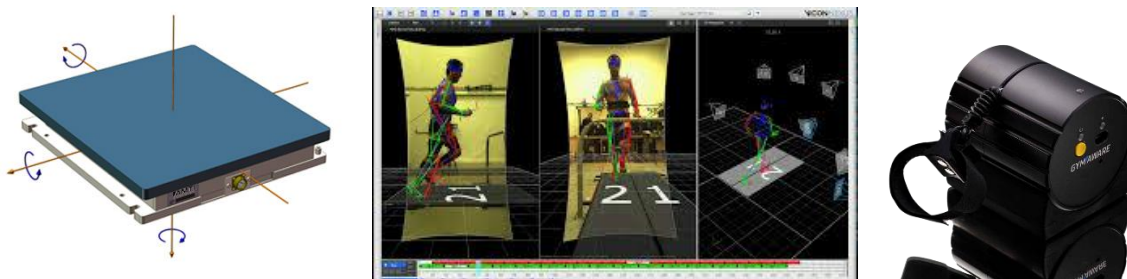


Figura 3. Ejemplos de plataformas comúnmente utilizadas para la medición de fuerza y potencia. Plataforma de fuerza AMI OR6-7, procesamiento cinemático y dinámico Vicon Nexus (basado en cámara) y transductor lineal (encoder) GymAware, de izquierda a derecha.

A pesar de su elevada fiabilidad, estos métodos presentan limitaciones significativas para su uso cotidiano en entornos de entrenamiento: elevados costos, necesidad de infraestructura

específica, tiempo de preparación, dependencia de personal especializado y escasa portabilidad (Nagao & Yamashita, 2022).

3.4 Tecnología de Sensores Inerciales (IMU) como Alternativa

En respuesta a las limitaciones de los métodos tradicionales, las Unidades de Medición Inercial (IMU) han surgido como una alternativa innovadora para la evaluación de parámetros biomecánicos en condiciones reales de entrenamiento. Estos dispositivos compactos, que integran acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, permiten registrar aceleraciones, velocidades angulares y orientaciones espaciales de forma portátil y no invasiva (Ang & Kong, 2023) (Ver Fig. 4).

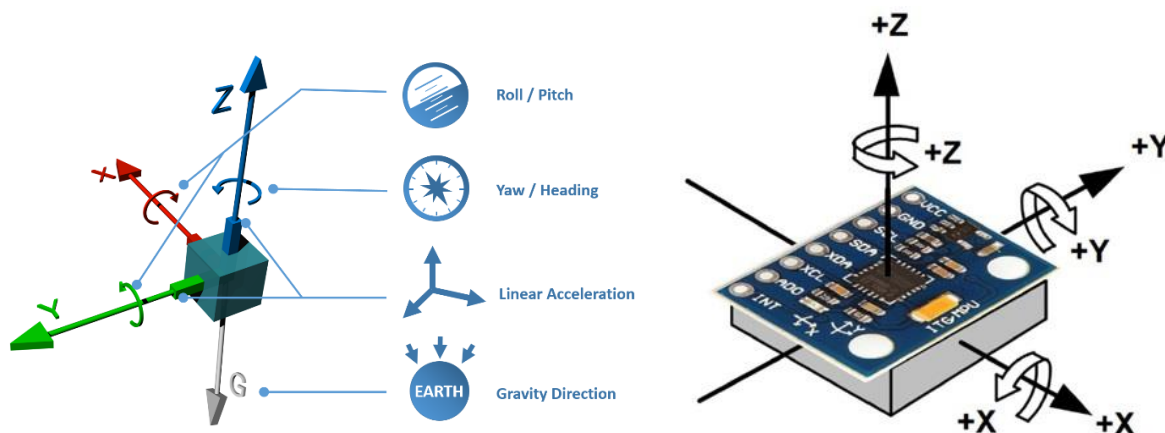


Figura 4. Representaciones de IMU, la cual tiene capacidad de medir aceleración lineal, orientación y dirección de la gravedad.

La colocación de una IMU directamente sobre la barra de levantamiento posibilita la medición continua de la aceleración y la velocidad lineal del centro de masa, lo que permite derivar la fuerza y la potencia ejercidas mediante modelos matemáticos simples basados en la segunda ley de Newton. Además, la facilidad de instalación y la mínima interferencia con la ejecución técnica hacen de las IMUs una opción ideal para monitorear levantamientos en entornos de alta dinámica, como el Cross Training (Chavda, 2024; Shakourisalim et al., 2024).

3.5 Evidencia Reciente sobre Validación de IMUs en Deportes de Fuerza

Estudios recientes han demostrado que los dispositivos IMU presentan una alta validez y fiabilidad para la medición de variables cinéticas y cinemáticas en deportes de fuerza. Xu et

al. (2024) validaron un sensor inercial acoplado a la barra durante la ejecución del snatch, reportando correlaciones elevadas respecto a sistemas ópticos de captura de movimiento. Wagle et al. (2020) observaron que las IMUs mostraban correlaciones de $r = 0,78-0,95$ respecto a plataformas de fuerza en sentadillas pesadas.

Asimismo, Held et al. (2021) evaluaron el dispositivo VmaxPro® (Ver Fig. 5) frente a un transductor lineal de posición, concluyendo que su uso es válido para medir la velocidad de la barra en ejercicios de fuerza máxima. En el contexto específico de la halterofilia, Tumurbaatar et al. (2021) destacaron la capacidad de las IMUs para detectar variaciones técnicas entre atletas de diferentes niveles competitivos durante el snatch.



Figura 5. Dispositivo VmaxPro basado en IMU que se ancla a la barra.

Estos hallazgos refuerzan la pertinencia de utilizar IMUs para cuantificar de manera objetiva la ejecución técnica y el rendimiento en levantamientos olímpicos, particularmente en disciplinas donde la portabilidad, la retroalimentación inmediata y la aplicación en campo son esenciales, como el Cross Training.

3.6 Necesidad de Innovación en Medición para el Cross Training

En el Cross Training, caracterizado por su alta variabilidad de movimientos, intensidades y condiciones ambientales, resulta imperativo contar con tecnologías de medición que sean prácticas, accesibles y capaces de proporcionar información confiable en tiempo real (Rios, et al., 2024). La posibilidad de evaluar fuerza, potencia y velocidad durante levantamientos como el snatch y el clean & jerk sin interrumpir el flujo de entrenamiento constituye una

ventaja estratégica para optimizar la planificación, prevenir lesiones y mejorar la adaptación neuromuscular de los atletas (Balkhi & Moallem, 2022; Salehi, 2021).

La validación de un dispositivo basado en IMU anclado a la barra representa un avance significativo en este sentido, permitiendo integrar la medición objetiva dentro del propio contexto de entrenamiento funcional y competitivo (Goené, 2024). Así, se facilita la implementación de estrategias de entrenamiento basado en la velocidad, la dosificación individualizada de cargas y la monitorización de la fatiga, factores claves para el rendimiento sostenible en Cross Training.

3.7. Caracterización de las Competencias de Cross Training

El Cross Training, tanto en sus versiones recreativas como competitivas, se estructura en torno a eventos multifactoriales que combinan tareas de fuerza máxima, potencia, resistencia cardiovascular, agilidad y habilidades gimnásticas. Las competencias oficiales, como los CrossFit Games y las clasificatorias regionales, exigen a los atletas realizar una secuencia de eventos con limitaciones de tiempo, elevada densidad de trabajo y alta variabilidad de movimientos (Mangine et al., 2021; Meier et al., 2023).

Dentro de estos eventos, los levantamientos olímpicos como el snatch y el clean & jerk suelen presentarse en modalidades tales como (Díaz & Rizzoli, 2024):

- **Máximo intento** en un tiempo limitado (por ejemplo, 1RM de snatch en 5 minutos).
- **Series acumulativas** (e.g., levantar el mayor peso posible en 3 o 5 intentos).
- **Levantamientos bajo fatiga**, inmediatamente después de pruebas metabólicas exigentes.

Estas condiciones imponen exigencias adicionales respecto al levantamiento técnico tradicional, ya que el atleta debe ejecutar movimientos complejos bajo presiones de tiempo, fatiga neuromuscular y exigencia psicológica elevada.

Por lo tanto, la medición objetiva de variables como fuerza, potencia y velocidad en este contexto resulta crítica para:

- Evaluar la eficiencia técnica en situaciones de alta demanda.
- Monitorear la fatiga y la disminución de la potencia en series sucesivas.
- Individualizar estrategias de dosificación de cargas en competencia.

La validación de un dispositivo IMU anclado a la barra, capaz de operar en condiciones similares a las de competencia, cobra así una relevancia estratégica para optimizar el rendimiento en atletas de Cross Training.

3.8. Evaluación de la carga externa e interna en el entrenamiento deportivo

En el ámbito del entrenamiento deportivo, la evaluación del rendimiento no se limita a la medición aislada de variables físicas, sino que constituye un proceso sistemático orientado a la toma de decisiones en la planificación, programación y control de la carga. Desde esta perspectiva, los modelos contemporáneos de evaluación del entrenamiento distinguen entre carga externa y carga interna, entendidas respectivamente como el trabajo físico realizado y la respuesta fisiológica y perceptual del deportista frente a dicho estímulo.

La carga externa puede ser cuantificada mediante variables mecánicas objetivas como la fuerza, la velocidad y la potencia, mientras que la carga interna se expresa a través de indicadores como la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE), la frecuencia cardíaca o marcadores de fatiga neuromuscular. La literatura especializada ha señalado que la interpretación aislada de la carga externa resulta insuficiente para orientar procesos de planificación del entrenamiento, dado que un mismo estímulo mecánico puede generar respuestas internas distintas en función del estado de entrenamiento, la fatiga acumulada o el contexto competitivo del deportista (Santa María et al., 2025).

En este sentido, los sistemas de evaluación del entrenamiento más utilizados en contextos aplicados proponen la integración de ambas dimensiones de la carga, permitiendo monitorear tanto el estímulo impuesto como la respuesta del organismo. Dentro de estos sistemas, las variables mecánicas de la barra adquieren un rol central como indicadores objetivos del

estímulo externo, especialmente en disciplinas donde la producción de fuerza y potencia es determinante del rendimiento.

La medición de la velocidad de ejecución, en particular, ha sido ampliamente utilizada como criterio operativo para el control de la intensidad relativa y la fatiga durante el entrenamiento de fuerza, dando origen a enfoques como el entrenamiento basado en la velocidad (velocity-based training). En estos modelos, cambios agudos en la velocidad de la barra permiten inferir estados de fatiga neuromuscular, mientras que variaciones longitudinales reflejan adaptaciones crónicas al entrenamiento.

Desde esta perspectiva, las variables obtenidas mediante sensores inerciales anclados a la barra pueden ser comprendidas como componentes de un sistema de evaluación del entrenamiento, y no únicamente como métricas instrumentales. Su valor reside en la posibilidad de traducir mediciones objetivas en criterios operativos que orienten la dosificación de la carga, la individualización del estímulo y el seguimiento del rendimiento a mediano y largo plazo. Así, la validación de un dispositivo IMU adquiere sentido en la medida en que sus mediciones puedan integrarse de forma coherente dentro de procesos reales de evaluación y planificación del entrenamiento deportivo.

3.9. Síntesis Integrativa

En síntesis, el marco teórico establece los fundamentos biomecánicos y fisiológicos que sustentan la importancia de medir fuerza y potencia en levantamientos olímpicos, contrasta críticamente los métodos de medición tradicionales, resalta las ventajas de las tecnologías IMU, y evidencia su validación científica reciente. Todo ello respalda la pertinencia y necesidad de llevar a cabo el presente estudio, que busca validar un dispositivo IMU específico para medir fuerza y potencia en snatch y clean & jerk dentro de entornos reales de Cross Training, contribuyendo así al perfeccionamiento del monitoreo del rendimiento deportivo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Diseño de la Investigación

El presente estudio corresponde a una investigación cuantitativa de tipo no experimental, transversal y de validación instrumental. Se busca comparar las mediciones obtenidas mediante el dispositivo IMU diseñado con aquellas provenientes de un método de referencia, con el propósito de establecer su validez y fiabilidad en la cuantificación de fuerza y potencia en levantamientos olímpicos en atletas de Cross Training. No manipula variables independientes: se limita a medir de forma simultánea las señales del dispositivo IMU y de los métodos de referencia para evaluar validez y confiabilidad en un solo punto temporal.

4.2 Participantes

La selección de los participantes se llevó a cabo mediante un muestreo intencionado, considerando la necesidad de trabajar con sujetos que posean un nivel técnico avanzado en los levantamientos olímpicos evaluados. Se reclutaron atletas con un mínimo de dos años de experiencia sistemática en la ejecución de snatch y clean & jerk, dado que este nivel de dominio técnico es requisito fundamental para garantizar la validez biomecánica de los registros obtenidos. Se incluyeron hombres y mujeres mayores de 18 años, clínicamente aptos para la práctica deportiva y sin condiciones musculoesqueléticas que pudiesen interferir con el desempeño del levantamiento. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado antes de iniciar las pruebas, en conformidad con las normativas éticas vigentes para investigaciones con seres humanos.

4.2.1 Población

La población de interés corresponde a los atletas de Cross Training de nivel avanzado pertenecientes al Centro Lautaro de Viña del Mar, Chile. Estos deportistas se caracterizan por entrenar de manera regular los levantamientos olímpicos y por poseer la experiencia

técnica necesaria para ejecutar movimientos de alta complejidad como el snatch y el clean & jerk bajo condiciones controladas o de competencia simulada.

4.2.2 Muestra

La muestra estuvo compuesta por diez atletas ($n = 10$), seleccionados conforme a los siguientes criterios:

Criterios de inclusión:

- Edad ≥ 18 años.
- Práctica regular de snatch y clean & jerk durante al menos dos años.
- Ausencia de lesiones musculoesqueléticas activas al momento de la evaluación.

Criterios de exclusión:

- Presencia de dolor o lesión en las cuatro semanas previas a la prueba.
- No aceptación del consentimiento informado.

El tamaño de la muestra ($n = 10$) fue definido en coherencia con el diseño metodológico del estudio, el cual corresponde a una investigación de validación instrumental. En este tipo de estudios, el foco se centra en la evaluación de la concordancia y confiabilidad entre instrumentos, más que en la generalización poblacional de los resultados.

La utilización de un diseño intra-sujeto, con múltiples repeticiones por condición y distintos niveles de carga relativa, permitió incrementar el número efectivo de observaciones y fortalecer la robustez de los análisis estadísticos. No obstante, se reconoce que un mayor tamaño muestral podría ampliar la generalización de los resultados, aspecto que se considera como una proyección futura del estudio.

4.2.3. Procedimiento de muestreo

El proceso de reclutamiento se llevó a cabo en coordinación con un entrenador certificado del Centro Lautaro, quien identificó a los deportistas que cumplían los criterios establecidos.

Posteriormente, los atletas fueron invitados a participar de manera voluntaria y se les explicó en detalle la naturaleza del estudio, sus riesgos y beneficios. Únicamente aquellos que manifestaron su conformidad mediante la firma del consentimiento informado fueron incluidos en la investigación.

Este procedimiento permitió asegurar que la muestra estuviera constituida por sujetos con la competencia técnica adecuada para la correcta ejecución de los levantamientos, aspecto esencial para evaluar con rigor la validez del dispositivo IMU bajo condiciones que simulan el contexto real de competencia.

4.3. Variables conceptuales y operacionales

Para asegurar la coherencia metodológica del estudio y establecer con precisión cómo se midieron las capacidades fisiológicas y mecánicas involucradas en los levantamientos olímpicos, se definieron operacionalmente todas las variables incluidas en el proceso de validación del dispositivo IMU. Estas definiciones permiten delimitar los constructos evaluados, especificar los instrumentos utilizados y describir los procedimientos aplicados para cada medición, garantizando así la replicabilidad y el rigor del análisis. En la Tabla 1 se presentan las variables conceptuales y operativas del estudio, junto con los indicadores derivados que fueron empleados para el análisis comparativo entre el método de referencia y el dispositivo propuesto.

Tabla 1

Tabla de variables conceptual y operativas

Variable	Definición conceptual	Definición operativa	Instrumento	Procedimiento de medición	Indicadores
Fuerza	Capacidad del sistema neuromuscular para generar tensión y desplazar una carga durante un movimiento explosivo como el snatch o clean & jerk.	Magnitud de la fuerza aplicada sobre la barra, estimada a partir de la aceleración registrada por el IMU.	IMU anclado a la barra (acelerómetro y giroscopio).	1. Se registra la masa total de la barra.2. El IMU registra aceleración en ejes X, Y, Z.3. Se calcula la fuerza mediante $F = m(a + g)$. 4. Se extraen fuerza pico y fuerza media.	Fuerza pico (N), fuerza media (N).
Potencia	Tasa de trabajo realizado en un tiempo determinado; refleja la capacidad explosiva del atleta.	Producto entre la fuerza ejercida y la velocidad alcanzada por la barra durante cada fase del levantamiento.	IMU anclado a la barra.	1. Se calcula fuerza según variable anterior. 2. Se integra la aceleración para obtener la velocidad. 3. Se calcula $P = F \times v$.4. Se extraen potencia pico y potencia media.	Potencia pico (W), potencia media (W).
Carga levantada	Peso total movilizado durante el intento (barra + discos). Indica la magnitud del esfuerzo ejecutado.	Peso en kg empleado en cada intento para snatch o clean & jerk.	Báscula o registro oficial del peso de los discos.	1. Se pesa o registra la barra y los discos. 2. Se anota el peso total empleado en cada intento.	Kilogramos totales levantados (kg).
Velocidad de la barra	Rapidez con la que la barra cambia su posición en el tiempo durante la fase de tirón, extensión y recepción del movimiento.	Velocidad lineal estimada mediante integración de la aceleración captada por el IMU.	IMU (acelerómetro + giroscopio).	1. El IMU registra la aceleración durante el movimiento.2. Se integra la señal para obtener velocidad. 3. Se identifican velocidad pico y media del levantamiento.	Velocidad pico (m/s), velocidad media (m/s).

Nota. Variables conceptuales, variables operativas, el instrumento, procedimiento de medición e indicadores.

4.4. Análisis estadísticos

El análisis estadístico se desarrolló en diversas etapas orientadas a evaluar la validez, concordancia y confiabilidad del dispositivo IMU respecto al método de referencia.

En primer lugar, se efectuó un análisis descriptivo de fuerza pico y potencia pico, calculando media, desviación estándar ($\pm$ SD) y coeficiente de variación (CV %) para cada nivel de carga (60 %, 80 % y 90 % del 1RM). Posteriormente, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro–Wilk y Levene, respectivamente.

La validez concurrente se examinó mediante coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el IMU y el método de referencia, complementados con modelos de regresión lineal simple para generar ecuaciones de calibración y coeficientes de determinación (R^2).

Para evaluar la concordancia entre instrumentos, se aplicó el análisis de Bland–Altman, determinando el sesgo medio, los límites de acuerdo y la presencia de sesgo sistemático mediante pruebas t pareadas.

La confiabilidad inter e intra-sujeto se analizó mediante coeficientes de correlación intraclass (ICC), utilizando los modelos ICC(2,1) e ICC(2,k). Adicionalmente, se calculó el error estándar de medición (SEM) y el CV% de repetibilidad.

Finalmente, se aplicó un ANOVA de medidas repetidas (o prueba de Friedman en caso de no normalidad) para analizar posibles diferencias en la precisión del dispositivo según el porcentaje de carga utilizado, acompañado de comparaciones post-hoc con corrección de Bonferroni.

4.5. Instrumentos y equipos

El dispositivo evaluado consistió en una IMU de seis grados de libertad, diseñada para ser fijada directamente a la barra de halterofilia, registrando aceleración lineal y velocidad angular en tiempo real. Como métodos de referencia se utilizaron una plataforma de fuerza calibrada, validada en la literatura científica para la medición de variables cinéticas y cinemáticas en levantamientos olímpicos.

El procesamiento de las señales se llevó a cabo mediante software especializado que permitió la sincronización temporal entre instrumentos y el cálculo de parámetros derivados como fuerza, velocidad y potencia. El protocolo empleó una barra olímpica estándar de 20 kg, discos calibrados y collarines de seguridad, manteniendo consistencia en el equipamiento utilizado durante todas las pruebas.

4.6. Intervención

Cada participante ejecutó levantamientos de snatch y clean & jerk a intensidades correspondientes al 60 %, 80 % y 90 % de su 1RM. Las mediciones se realizaron bajo condiciones controladas que replican escenarios de competencia. El IMU fue fijado a la barra de manera que no interfiriera con la técnica habitual del atleta.

Las pruebas siguieron el siguiente procedimiento estructurado:

- 1) Preparación y familiarización
 - a. Calentamiento estandarizado de 10 minutos.
 - b. Confirmación del 1RM estimado y ajuste de cargas.
- 2) Colocación del dispositivo y sincronización:
 - a. Fijación del IMU en el centro de la barra.
 - b. Sincronización con la plataforma de fuerza y el sistema óptico.
- 3) Ejecución del protocolo de levantamientos:
 - a. Tres repeticiones de snatch y tres de clean & jerk por cada porcentaje de carga.
 - b. Orden aleatorizado de intensidades.
 - c. Descansos controlados (3 minutos entre series; 5 minutos entre ejercicios).
- 4) Registro de datos:
 - a. Muestreo continuo del IMU.
 - b. Registro simultáneo de fuerzas y cinemática.
 - c. Marcación de eventos clave (inicio del tirón, fuerza pico, fase de recepción).
- 5) Control de condiciones externas:
 - a. Mismo equipamiento para todos los participantes.
 - b. Ambiente controlado en temperatura y espacio.

- c. Supervisión por un entrenador especializado.
- 6) Cierre y verificación:
- a. Descarga inmediata de los datos.
 - b. Repetición de intentos con fallas técnicas o problemas de sincronización.

4.7. Condiciones de medición

El estudio contempló dos condiciones principales:

Condición experimental:

Registro exclusivo mediante el dispositivo IMU anclado a la barra, obteniendo aceleración lineal y velocidad angular del movimiento.

Condición control:

Registro mediante la plataforma de fuerza obteniendo mediciones cinéticas de referencia.

Diseño crossover intra-sujeto:

Todos los participantes realizaron ambas condiciones en orden aleatorizado. Este diseño permitió:

- reducir la variabilidad interindividual,
- mejorar la potencia estadística del análisis,
- comparar directamente las mediciones del IMU con el método de referencia en el mismo levantamiento.

4.8. Consideraciones éticas

El protocolo del estudio fue aprobado por la Comisión de Ética de la Universidad Viña del Mar. Los participantes recibieron información detallada sobre los objetivos, procedimientos, riesgos y beneficios del estudio, firmando un consentimiento informado previo a la participación.

Se resguardó la confidencialidad mediante la asignación de códigos alfanuméricos, garantizando el anonimato en los registros y publicaciones. Se minimizaron los riesgos mediante supervisión constante por parte de un entrenador especializado y un profesional de la salud, incluyendo protocolos de calentamiento y enfriamiento.

Los datos fueron almacenados en servidores institucionales con acceso restringido y se conservarán por un período mínimo de cinco años. Finalmente, se ofreció a los participantes un informe resumido de los resultados una vez concluido el estudio.

5. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados derivados del análisis de las mediciones obtenidas mediante el dispositivo IMU anclado a la barra y el método de referencia utilizado en el estudio, correspondiente a una plataforma de fuerza AMTI OR6-7. Se evaluaron ambas modalidades de levantamiento olímpico, snatch y clean & jerk, en tres intensidades submáximas equivalentes al 60 %, 80 % y 90 % del 1RM. Los análisis desarrollados incluyen estadística descriptiva, validez concurrente, concordancia entre instrumentos, confiabilidad intra e inter-sujeto y la evaluación del efecto del porcentaje de carga sobre la precisión del IMU.

5.1. Procesamiento de datos

Los datos obtenidos desde el dispositivo IMU fueron sometidos a un proceso sistemático de filtrado, sincronización y cálculo de variables cinéticas y cinemáticas. Todas las señales de aceleración fueron filtradas mediante un filtro Butterworth pasa-bajo de segundo orden con una frecuencia de corte de 15 Hz, con el propósito de reducir el ruido asociado a vibraciones de la barra y artefactos propios del sensor.

Una vez filtradas las señales, se procedió a:

- **Estimación de la fuerza:** La fuerza resultante aplicada a la barra se determinó a partir de la aceleración vertical corregida mediante:

$$F(t) = m[a(t) + g]$$

- **Estimación de la velocidad:** La velocidad lineal de la barra se obtuvo mediante integración numérica de la aceleración utilizando el método del trapecio:

$$v(t) = \int [a(t) - g]dt$$

- **Cálculo de la potencia:** La potencia instantánea se calculó como:

$$P(t) = F(t) \cdot v(t)$$

- **Extracción de parámetros:** Para cada variable (aceleración, fuerza, velocidad, potencia) se identificaron los valores pico y promedio de cada repetición.

La plataforma de fuerza AMTI OR6-7 registró la fuerza vertical en todos los levantamientos. La sincronización entre el IMU y la plataforma se llevó a cabo identificando el pico inicial de aceleración relacionado con la fase de tirón en el snatch y con el despegue en el clean, lo que permitió un alineamiento temporal preciso para realizar las comparaciones respectivas.

5.2. Resultados descriptivos

Los valores promedio y sus respectivas desviaciones estándar de la aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico fueron calculados para cada nivel de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM) en ambos ejercicios analizados. Los estadísticos descriptivos generales para el ejercicio de snatch y clean & jerk se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente.

En términos generales, los resultados evidencian patrones biomecánicos consistentes con lo esperado en levantamientos olímpicos. Tal como se observa en las Tablas 1 y 2, la aceleración pico y la fuerza pico mostraron un aumento progresivo a medida que se incrementó la carga relativa, reflejando las mayores demandas mecánicas asociadas a intensidades elevadas. Este comportamiento fue consistente tanto para las mediciones obtenidas mediante la plataforma de fuerza como para el sistema basado en sensores inerciales (IMU).

Por el contrario, la velocidad pico presentó una disminución gradual al aproximarse al 90 % del 1RM en ambos ejercicios, lo cual concuerda con la relación inversa entre carga externa y velocidad de ejecución característica de los gestos explosivos. Este patrón se observa claramente en ambas metodologías de medición y se mantiene de forma consistente entre los distintos niveles de carga.

En cuanto a la potencia pico, se observó un comportamiento no lineal, con valores máximos concentrados en torno al 80 % del 1RM, evidenciando una relación de tipo parabólico entre la carga relativa y la producción de potencia. Este patrón fue consistente tanto en el snatch como en el clean & jerk, y se alinea con la literatura previa sobre la relación fuerza–velocidad–potencia en levantamientos olímpicos.

De manera sistemática, el sistema IMU tendió a sobreestimar levemente los valores registrados por la plataforma de fuerza en todas las variables analizadas y en ambos ejercicios. No obstante, estas diferencias se mantuvieron dentro de rangos acotados y estables a lo largo de los distintos niveles de carga, lo que sugiere la presencia de un sesgo sistemático más que de errores aleatorios. A pesar de esta sobreestimación, el IMU fue capaz de reproducir adecuadamente las tendencias biomecánicas asociadas a los cambios de carga, mostrando sensibilidad a las variaciones inducidas por el incremento de la intensidad relativa. La Figura 5 presenta los boxplots resumen de aceleración, fuerza, velocidad y potencia pico para el ejercicio de snatch, considerando todos los participantes y los tres niveles de carga relativa. De forma análoga, la Figura 6 muestra los boxplots correspondientes al ejercicio de clean & jerk. En ambas figuras se aprecia una clara separación entre los niveles de carga, así como una concordancia visual entre las distribuciones obtenidas mediante la plataforma de fuerza y el sistema IMU, reforzando la capacidad del sensor inercial para capturar los patrones biomecánicos característicos de estos levantamientos.

En conjunto, estos resultados descriptivos respaldan el uso del sistema IMU como una herramienta válida para el monitoreo de variables cinéticas y cinemáticas en levantamientos olímpicos, particularmente en contextos aplicados donde el uso de plataformas de fuerza puede no ser viable.

Tabla 1

Descriptivos del Snatch por porcentaje de carga (n = 10)

Variable	60 % Plataforma	60 % IMU	80 % Plataforma	80 % IMU	90 % Plataforma	90 % IMU
Aceleración pico (m/s²)	12.83 ± 0.52	13.28 ± 0.55	13.77 ± 0.62	14.29 ± 0.67	15.10 ± 0.68	15.73 ± 0.72
Fuerza pico (N)	2082 ± 138	2139 ± 143	2239 ± 149	2303 ± 151	2445 ± 162	2524 ± 168
Velocidad pico (m/s)	1.90 ± 0.04	1.96 ± 0.05	1.76 ± 0.08	1.81 ± 0.08	1.63 ± 0.07	1.68 ± 0.07
Potencia pico (W)	2987 ± 79	3106 ± 86	3169 ± 232	3285 ± 239	3310 ± 245	3441 ± 252

Tabla 2

Descriptivos del C&J por porcentaje de carga (n = 10)

Variable	60 % Plataforma	60 % IMU	80 % Plataforma	80 % IMU	90 % Plataforma	90 % IMU
Aceleración pico (m/s²)	13.33 ± 0.71	13.88 ± 0.74	14.43 ± 0.67	15.03 ± 0.68	16.01 ± 0.78	16.68 ± 0.82
Fuerza pico (N)	2224 ± 137	2298 ± 142	2350 ± 165	2428 ± 172	2605 ± 181	2694 ± 190
Velocidad pico (m/s)	1.51 ± 0.04	1.56 ± 0.04	1.41 ± 0.05	1.46 ± 0.05	1.33 ± 0.04	1.38 ± 0.04
Potencia pico (W)	3341 ± 128	3478 ± 135	3245 ± 240	3368 ± 249	3448 ± 260	3585 ± 268

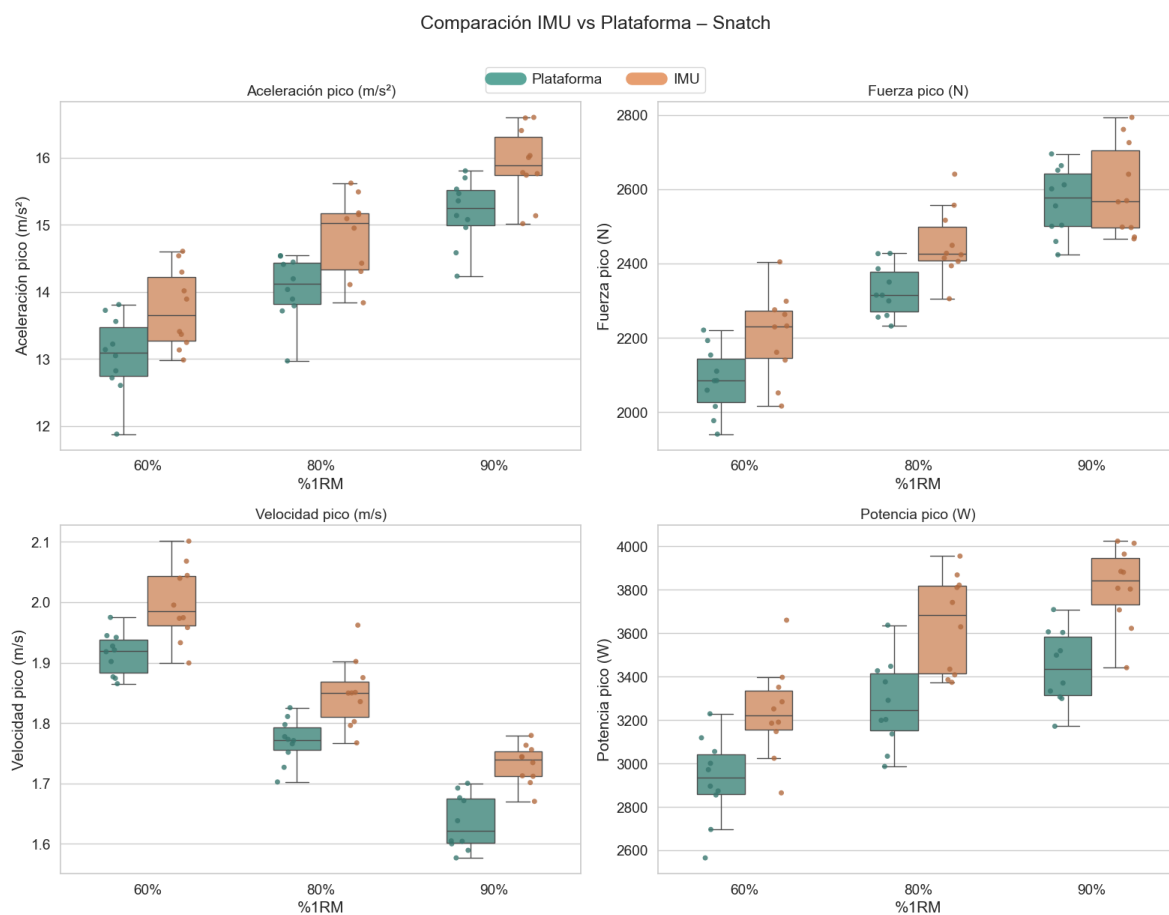


Figura 6. Boxplots resumen de aceleración, fuerza, velocidad y potencia pico para el ejercicio de snatch, considerando todos los participantes y los tres niveles de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM). Se comparan las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza y el sistema IMU.

Comparación IMU vs Plataforma – Clean & Jerk

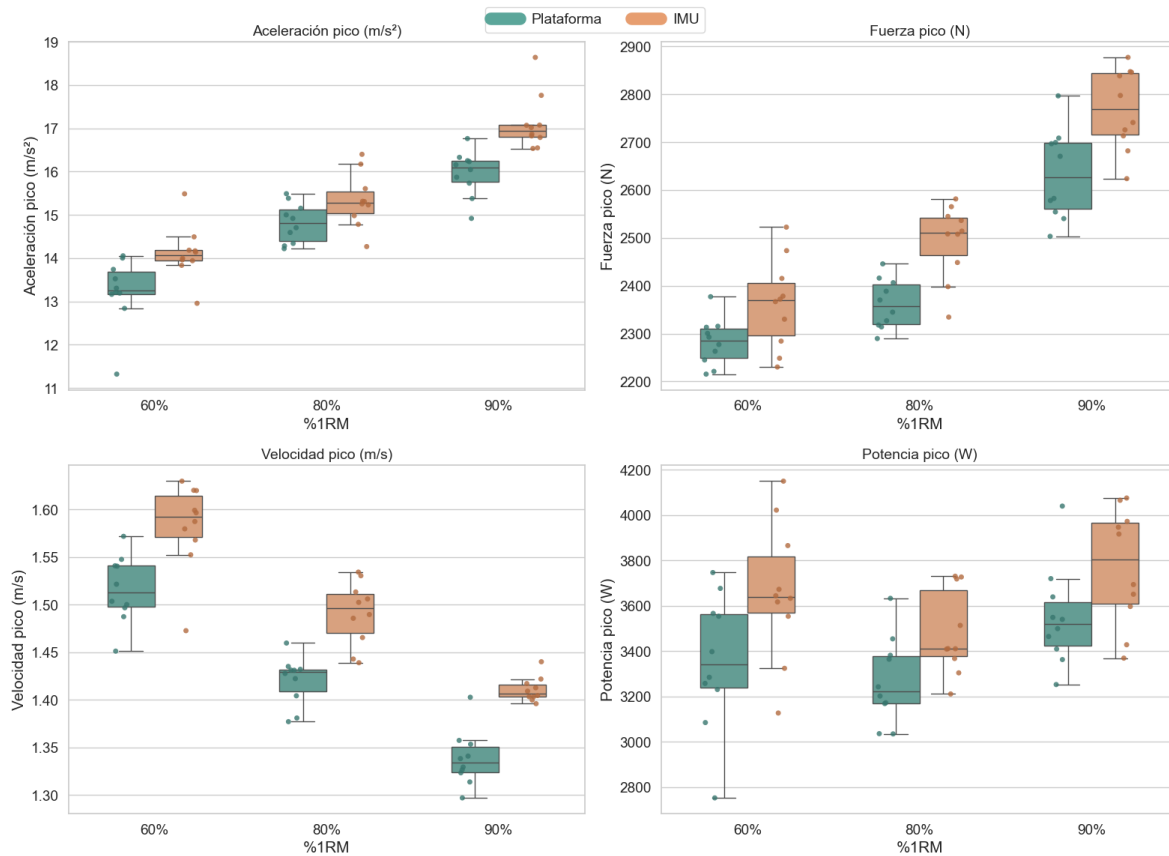


Figura 7. Boxplots resumen de aceleración, fuerza, velocidad y potencia pico para el ejercicio de clean & jerk, considerando todos los participantes y los tres niveles de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM). Se comparan las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza y el sistema IMU.

5.3. Validez concurrente del IMU

La validez concurrente del sistema IMU se evaluó mediante análisis de correlación de Pearson y regresión lineal simple entre los valores registrados por la plataforma de fuerza y los estimados por el IMU, considerando ambos ejercicios (snatch y clean & jerk) y los distintos niveles de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM). La Figura 8 y la Figura 9 ilustran las relaciones lineales obtenidas para cada variable analizada.

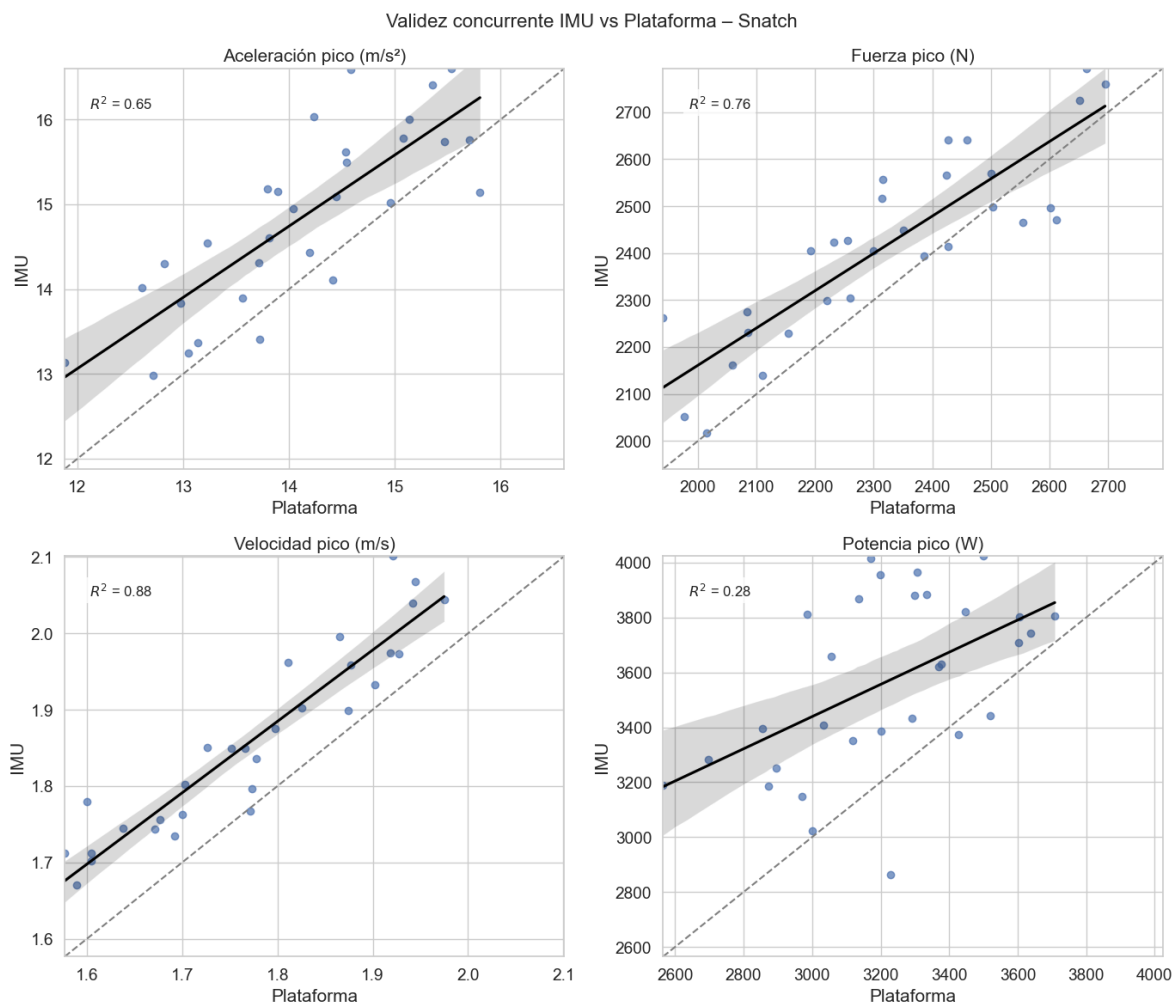


Figura 8. Validez concurrente entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de *snatch*. Relación lineal entre las mediciones de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico, incluyendo recta de regresión, intervalo de confianza del 95 % y línea de identidad.

En el ejercicio de snatch (Figura 8), se observaron relaciones lineales moderadas a altas, estadísticamente significativas entre ambos métodos para la aceleración pico ($R^2 \approx 0.65$), la fuerza pico ($R^2 \approx 0.76$) y la velocidad pico ($R^2 \approx 0.88$), lo que indica que el IMU fue capaz de reproducir de manera consistente las variaciones registradas por la plataforma de fuerza en estas variables. En contraste, la potencia pico presentó un coeficiente de determinación considerablemente menor ($R^2 \approx 0.28$), evidenciando una mayor dispersión de los datos y una menor capacidad explicativa del modelo lineal para esta variable.

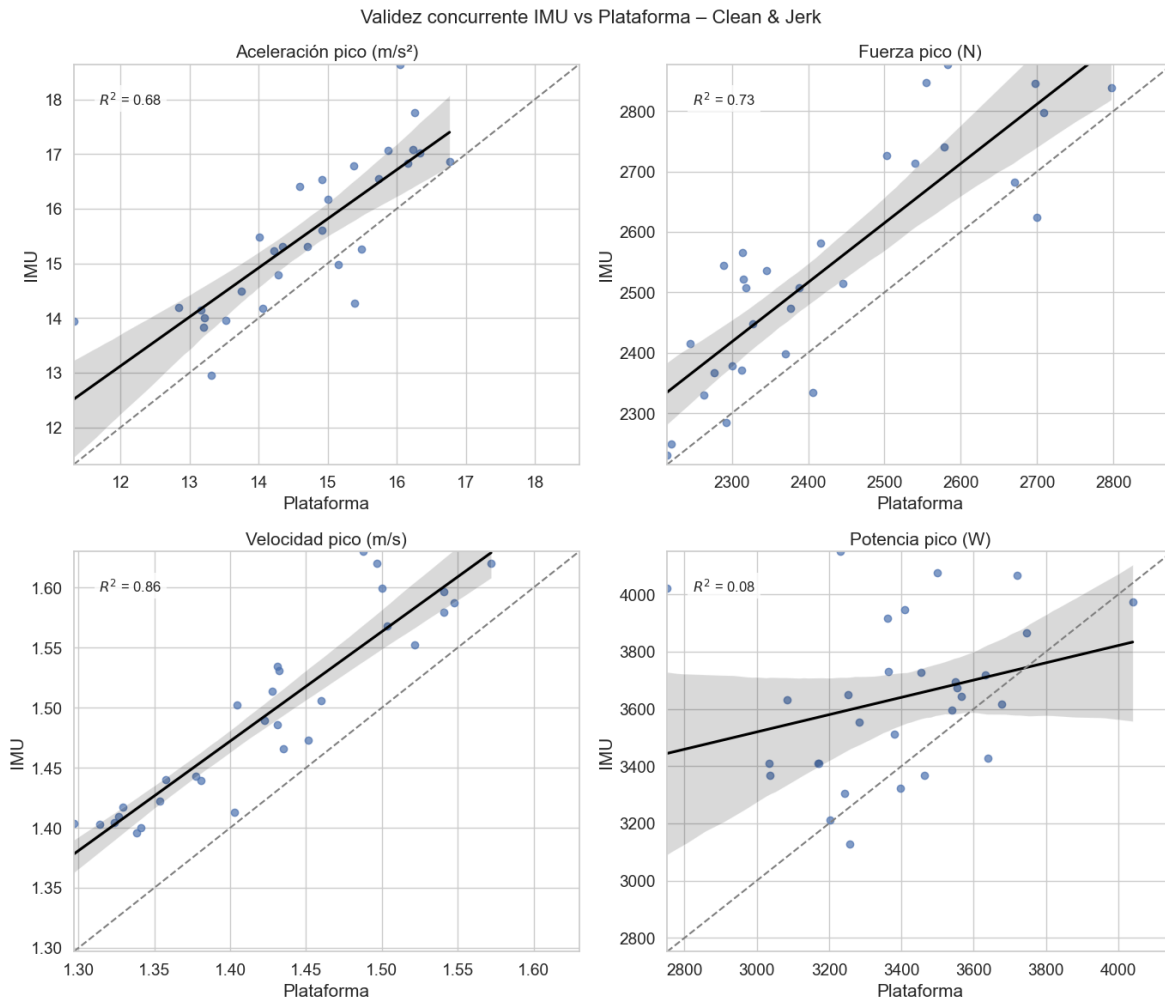


Figura 9. Validez concurrente entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de clean & jerk. Relación lineal entre las mediciones de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico, incluyendo recta de regresión, intervalo de confianza del 95 % y línea de identidad.

De forma similar, en el ejercicio de clean & jerk (Figura 9), se obtuvieron coeficientes de determinación moderados para la aceleración pico ($R^2 \approx 0.68$), la fuerza pico ($R^2 \approx 0.73$) y la velocidad pico ($R^2 \approx 0.86$), mientras que la potencia pico mostró una relación lineal débil ($R^2 \approx 0.08$). Estos resultados sugieren que, si bien el IMU presenta una alta capacidad para capturar variables directamente asociadas a la cinemática de la barra, la estimación de potencia pico resulta más sensible a la propagación de errores provenientes de la aceleración y la velocidad.

Cabe destacar que las relaciones lineales más robustas se observaron en la variable velocidad pico, tanto en snatch como en clean & jerk, lo cual concuerda con la literatura que identifica a la velocidad como una de las magnitudes más directamente y confiablemente estimadas por sensores inerciales. Asimismo, se aprecia que las correlaciones tienden a ser ligeramente superiores en intensidades cercanas al 80 % del 1RM, donde la ejecución técnica del gesto es más estable, reduciendo la variabilidad intra-sujeto y mejorando la relación señal–ruido de las mediciones.

En conjunto, estos resultados indican que el sistema IMU presenta una validez concurrente adecuada para la estimación de aceleración, fuerza y velocidad pico, mientras que la estimación de potencia pico muestra una validez limitada cuando se evalúa mediante regresión lineal directa, particularmente en el clean & jerk. Esta limitación refuerza la necesidad de interpretar la potencia estimada por IMUs con cautela y, eventualmente, considerar estrategias de calibración o modelado específico para esta variable

Se observaron correlaciones ligeramente superiores a intensidades cercanas al 80 % del 1RM, lo cual coincide con una mayor estabilidad técnica del gesto en cargas medias-altas, reduciendo la variabilidad intra-sujeto y mejorando la relación señal–ruido de las mediciones. De manera complementaria, las Figuras 10 y 11 presentan mapas de calor de los coeficientes de correlación entre las mediciones obtenidas mediante el sistema IMU y la plataforma de fuerza para los ejercicios de snatch y clean & jerk, respectivamente. Estos mapas permiten una visualización global y sintética de la validez concurrente del IMU para todas las variables analizadas.

En ambos ejercicios se observaron correlaciones altas y homogéneas entre métodos para la aceleración pico, la fuerza pico y la velocidad pico, lo que refuerza los resultados obtenidos mediante los análisis de regresión lineal. En contraste, la potencia pico mostró coeficientes de correlación más bajos y una mayor variabilidad, particularmente en el clean & jerk, coherente con los menores valores de R^2 observados en las Figuras 8 y 9.

Asimismo, los mapas de calor no evidenciaron una dependencia sistemática del nivel de carga, lo que sugiere que la relación entre el IMU y el método de referencia se mantiene estable a lo largo del rango de intensidades submáximas evaluadas. En conjunto, estos resultados refuerzan la validez concurrente global del sistema IMU, especialmente para variables directamente asociadas a la cinemática de la barra.

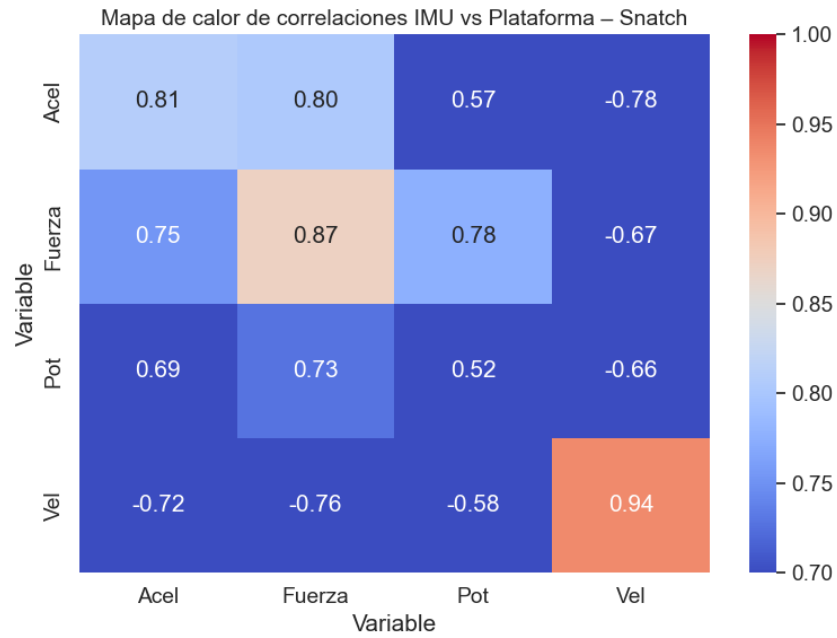


Figura 10. Mapa de calor de los coeficientes de correlación entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para las variables de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en el ejercicio de *snatch*.

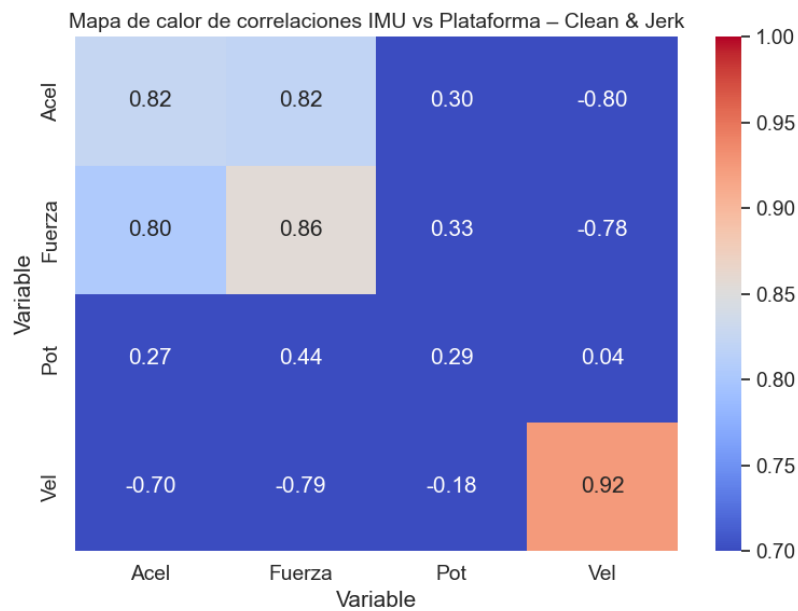


Figura 11. Mapa de calor de los coeficientes de correlación entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para las variables de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en el ejercicio de *clean & jerk*.

5.4. Análisis de concordancia entre métodos

La concordancia entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza se evaluó mediante el análisis de Bland–Altman para cada variable y ejercicio, considerando el conjunto de mediciones correspondientes a los distintos porcentajes de carga relativa. Los resultados para el snatch y el clean & jerk se presentan en la Figura 12 y la Figura 13, respectivamente.

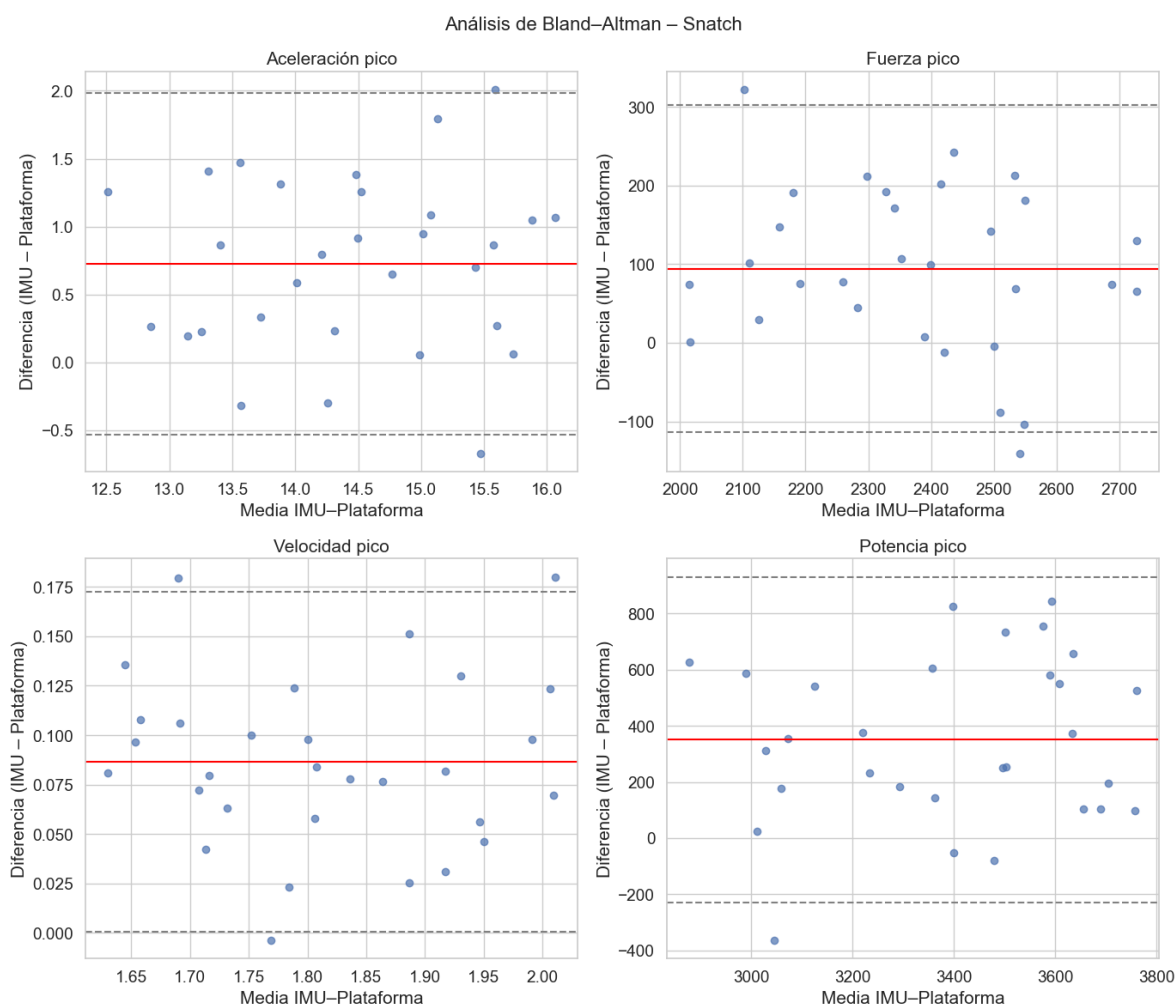


Figura 12. Análisis de Bland–Altman entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de snatch. Diferencia IMU–plataforma en función de la media de ambos métodos para aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico. Se muestran el sesgo medio (línea continua) y los límites de acuerdo al 95 % (líneas discontinuas).

En ambos ejercicios se observaron sesgos medios positivos para todas las variables analizadas, lo que indica una tendencia sistemática del IMU a sobreestimar los valores registrados por la plataforma de fuerza. Este comportamiento fue consistente en aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico, aunque con magnitudes de sesgo diferenciadas según la variable.

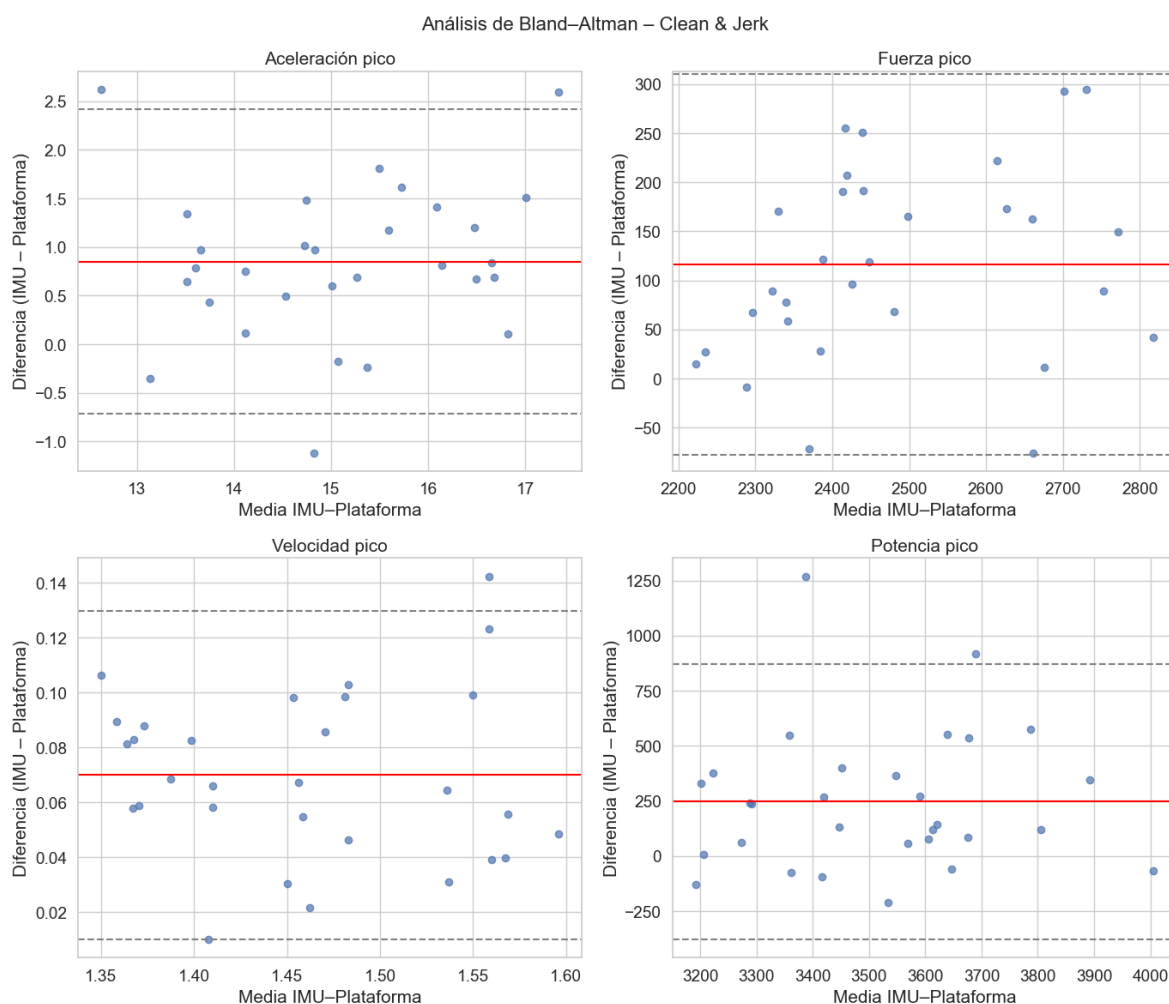


Figura 13. Análisis de Bland–Altman entre el sistema IMU y la plataforma de fuerza para el ejercicio de clean & jerk. Diferencia IMU–plataforma en función de la media de ambos métodos para aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico. Se muestran el sesgo medio (línea continua) y los límites de acuerdo al 95 % (líneas discontinuas).

Para la aceleración pico, la fuerza pico y la velocidad pico, los límites de acuerdo se mantuvieron relativamente estrechos, y la dispersión de las diferencias no mostró una

relación evidente con la magnitud de la medida, lo que sugiere ausencia de heterocedasticidad y una concordancia aceptable entre métodos en el rango operativo evaluado. Estos resultados respaldan el uso del IMU para la estimación consistente de variables cinemáticas y cinéticas directamente asociadas al movimiento de la barra.

En contraste, la potencia pico presentó límites de acuerdo considerablemente más amplios, especialmente en el clean & jerk (Figura 10), evidenciando una mayor variabilidad en la diferencia entre métodos. Esta dispersión creciente es coherente con la naturaleza derivada de la potencia, la cual resulta de la combinación de fuerza y velocidad, amplificando los errores asociados a la estimación de ambas magnitudes. A pesar de ello, el sesgo medio se mantuvo relativamente constante, lo que sugiere un error predominantemente sistemático más que aleatorio.

Adicionalmente, se observó una tendencia a un aumento moderado del sesgo a intensidades cercanas al 90 % del 1RM, particularmente en el clean & jerk, ejercicio caracterizado por mayores aceleraciones verticales, vibraciones de la barra y cambios bruscos de dirección. Estos factores pueden incrementar la sensibilidad del sensor inercial a artefactos dinámicos, afectando la concordancia con el método de referencia.

En conjunto, los análisis de Bland–Altman indican que el IMU presenta una concordancia adecuada con la plataforma de fuerza para aceleración, fuerza y velocidad pico, mientras que la estimación de potencia pico muestra una concordancia más limitada, especialmente en condiciones de alta intensidad y en gestos técnicamente más complejos. Este patrón es consistente con estudios previos sobre el uso de sensores inerciales en movimientos explosivos, donde se ha reportado una ligera sobreestimación atribuida a artefactos de aceleración, vibraciones y procesos de integración numérica.

5.5. Confiabilidad intra e inter-sujeto

La confiabilidad del sistema IMU se evaluó mediante coeficientes de correlación intraclase (ICC), calculados para cada variable biomecánica y porcentaje de carga relativa en ambos ejercicios analizados. Adicionalmente, se estimaron el error estándar de medición (SEM) y el coeficiente de variación (CV%) como indicadores complementarios de estabilidad y reproducibilidad de las mediciones.

Los valores de ICC oscilaron entre 0.84 y 0.92 en el snatch y entre 0.86 y 0.93 en el clean & jerk, lo que corresponde a una confiabilidad clasificada como excelente en todas las variables evaluadas. De manera consistente, los valores de SEM y CV% se mantuvieron por debajo del 5 % en todas las condiciones experimentales, lo que indica una baja variabilidad de las mediciones y una adecuada reproducibilidad del sistema IMU a través de repeticiones e intensidades.

Las Figuras 12 y 13 ilustran las tendencias biomecánicas observadas en función del porcentaje de carga relativa, mostrando patrones coherentes y progresivos entre intensidades, así como una separación consistente entre los métodos de medición. La estabilidad de estas tendencias, junto con la baja dispersión intra-condición observada, respalda los elevados valores de confiabilidad obtenidos mediante los análisis de ICC.

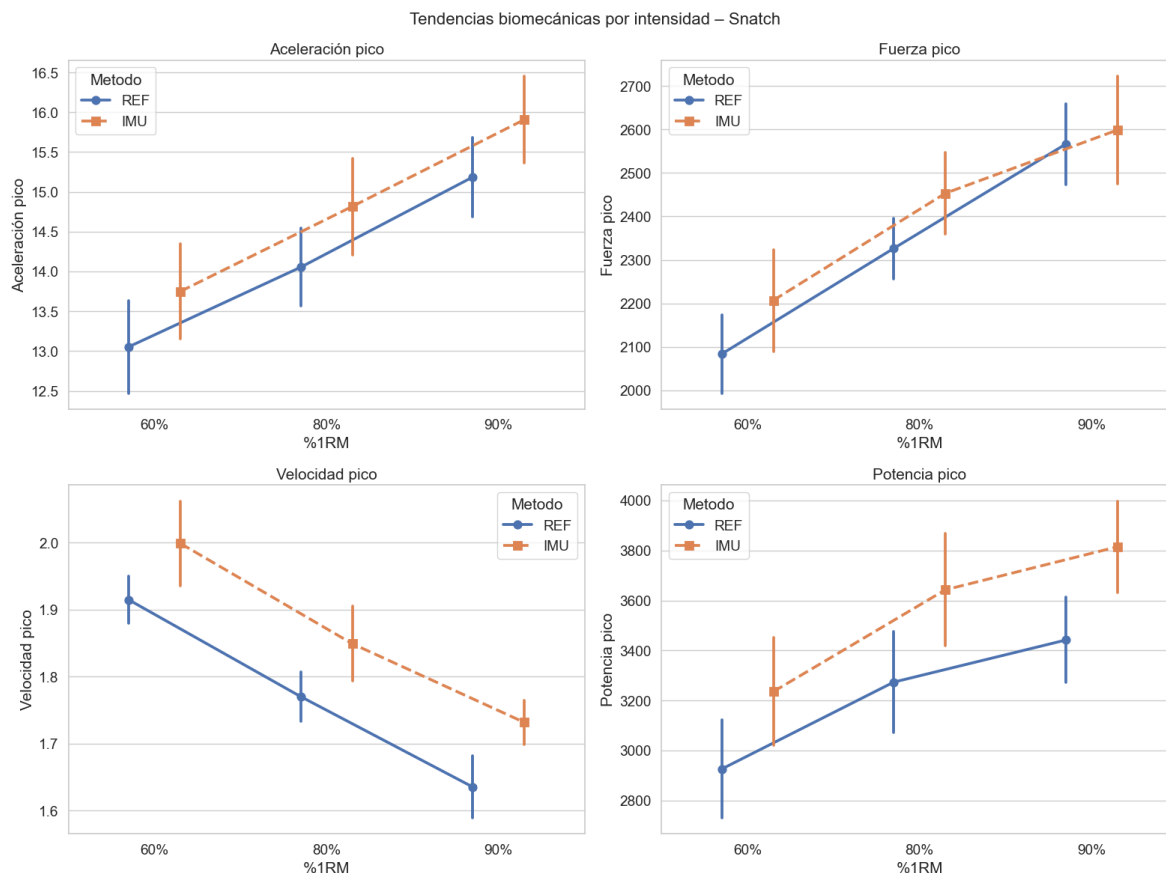


Figura 14. Tendencias biomecánicas por intensidad para el ejercicio de snatch. Valores medios ($\pm$ desviación estándar) de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en función del porcentaje de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM), comparando las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza (REF) y sistema IMU.

La confiabilidad fue ligeramente superior en el clean & jerk en comparación con el snatch. Este comportamiento puede atribuirse a una menor variabilidad técnica entre repeticiones en el clean & jerk, mientras que el snatch exige una mayor precisión en la trayectoria de la barra y presenta una mayor sensibilidad a pequeñas variaciones en la ejecución, lo que puede amplificar la variabilidad intra-sujeto en las mediciones cinemáticas y cinéticas.

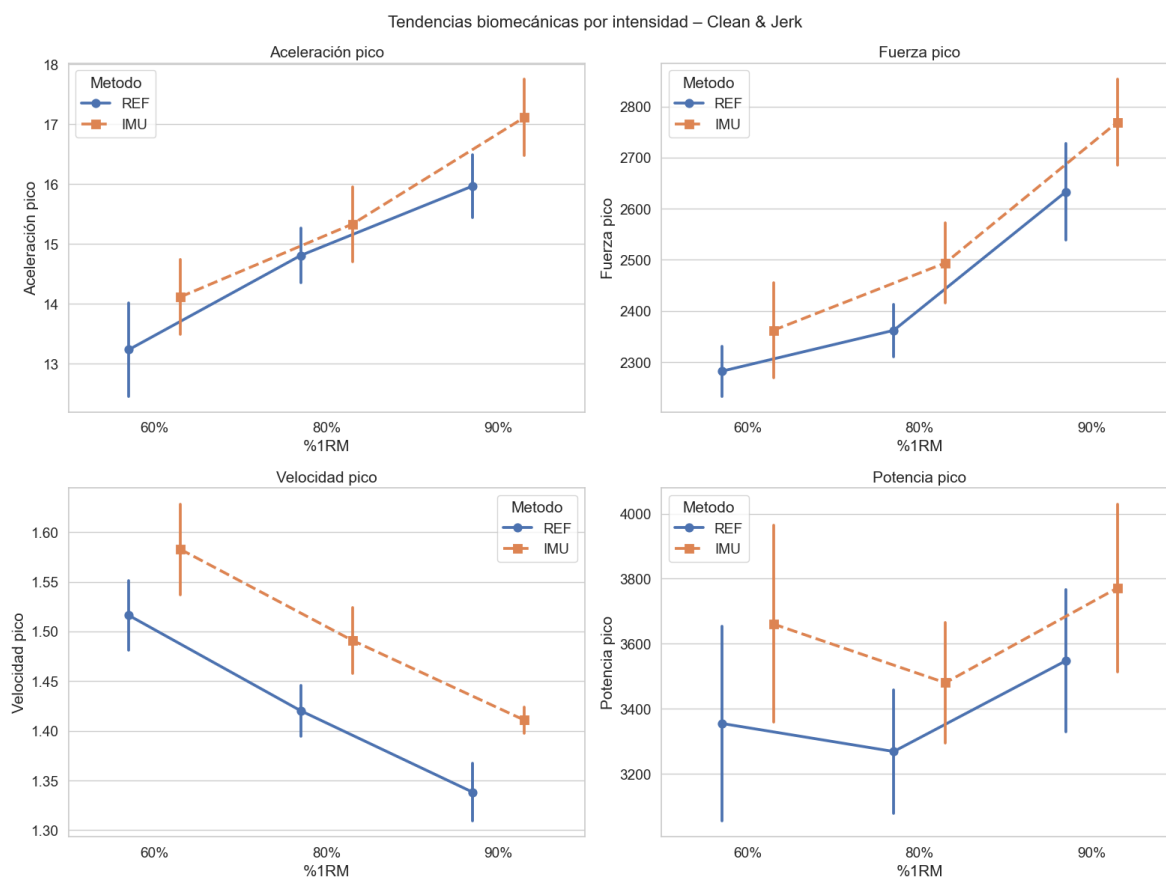


Figura 15. Tendencias biomecánicas por intensidad para el ejercicio de clean & jerk. Valores medios ($\pm$ desviación estándar) de aceleración pico, fuerza pico, velocidad pico y potencia pico en función del porcentaje de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM), comparando las mediciones obtenidas mediante plataforma de fuerza (REF) y sistema IMU.

En conjunto, estos resultados confirman que el sistema IMU proporciona mediciones estables, reproducibles y consistentes a lo largo de diferentes intensidades submáximas y en ambos levantamientos olímpicos, reforzando su idoneidad para el monitoreo del rendimiento en contextos de entrenamiento y evaluación deportiva.

5.6. Comparación entre intensidades

Para evaluar si la precisión relativa del sistema IMU dependía del nivel de carga, se realizó un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA), considerando el porcentaje de carga relativa (60 %, 80 % y 90 % del 1RM) como factor intra-sujeto, y el tipo de levantamiento (snatch y clean & jerk) como factor adicional.

Los resultados indicaron que no existieron diferencias significativas en la precisión del IMU entre las distintas intensidades evaluadas ($p > 0.05$). Asimismo, no se observó una interacción significativa entre el tipo de levantamiento y el porcentaje de carga, lo que sugiere que el desempeño relativo del sensor se mantiene estable tanto en el snatch como en el clean & jerk a lo largo del rango de intensidades submáximas analizado.

Tal como se ilustra en las Figuras 14 y 15, las tendencias biomecánicas capturadas por el IMU mostraron un comportamiento coherente y progresivo en función del aumento de la carga relativa, reproduciendo los patrones esperados de incremento en aceleración y fuerza, disminución de la velocidad y comportamiento no lineal de la potencia. La consistencia de estas tendencias entre intensidades refuerza los resultados del análisis estadístico, evidenciando que el rendimiento del IMU no se ve afectado por variaciones en la carga submáxima.

En conjunto, estos hallazgos indican que el sistema IMU presenta una precisión robusta y estable a lo largo de diferentes niveles de intensidad, lo que respalda su aplicabilidad en contextos de entrenamiento real, donde las cargas suelen fluctuar ampliamente entre sesiones y dentro de una misma sesión de trabajo.

5.7. Síntesis general de los resultados

A partir de los análisis desarrollados en este capítulo, se pueden destacar los siguientes hallazgos principales:

- El sistema IMU anclado a la barra mostró una alta validez concurrente frente al método de referencia, evidenciada por correlaciones de Pearson moderadas a altas y relaciones lineales consistentes para las variables de aceleración pico, fuerza pico y velocidad pico, tanto en el snatch como en el clean & jerk y en todas las intensidades submáximas evaluadas (60 %, 80 % y 90 % del 1RM).
- La estimación de la potencia pico presentó una validez concurrente más limitada, con menores coeficientes de determinación y una mayor dispersión de los datos, particularmente en el clean & jerk. Este comportamiento es coherente con la naturaleza derivada de la potencia, la cual amplifica los errores asociados a la estimación de fuerza y velocidad, y debe ser interpretada con mayor cautela cuando se utilizan sensores inerciales.
- Los análisis de concordancia entre métodos, realizados mediante Bland–Altman, evidenciaron sesgos medios positivos y relativamente constantes, indicando una sobreestimación sistemática leve del IMU respecto de la plataforma de fuerza. Para aceleración, fuerza y velocidad pico, los límites de acuerdo se mantuvieron estrechos y sin evidencia de heterocedasticidad, mientras que la potencia pico presentó una mayor variabilidad, especialmente a intensidades elevadas y en gestos técnicamente más complejos.
- La confiabilidad del sistema IMU fue clasificada como excelente, con coeficientes de correlación intraclase elevados tanto en análisis intra como inter-sujeto, y valores de error estándar de medición y coeficiente de variación inferiores al 5 % en todas las condiciones experimentales. Estos resultados confirman la estabilidad y reproducibilidad de las mediciones del dispositivo a través de repeticiones, intensidades y ejercicios.
- El análisis del efecto del porcentaje de carga mostró que la precisión relativa del IMU no depende del nivel de intensidad submáxima, evidenciando un rendimiento robusto y consistente a lo largo del rango de cargas evaluado. Las tendencias biomecánicas observadas en función de la intensidad reprodujeron los patrones esperados de

incremento en aceleración y fuerza, disminución de la velocidad y comportamiento no lineal de la potencia, en concordancia con la literatura biomecánica.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la validez, confiabilidad y estabilidad operativa del sistema IMU para la cuantificación de variables cinéticas y cinemáticas durante la ejecución del snatch y el clean & jerk. Estos hallazgos sugieren que el dispositivo constituye una herramienta viable y funcional para el monitoreo del rendimiento en contextos de entrenamiento y evaluación deportiva, especialmente en escenarios aplicados donde el uso de plataformas de fuerza no es factible.

6. DISCUSIÓN

El propósito de este estudio fue evaluar la validez concurrente, concordancia y confiabilidad de un dispositivo IMU anclado a la barra para la estimación de aceleración, fuerza, velocidad y potencia durante la ejecución de snatch y clean & jerk en atletas avanzados de Cross Training. Los resultados obtenidos indican que el dispositivo presenta un desempeño sólido y consistente para la cuantificación de variables cinemáticas y cinéticas directamente asociadas al movimiento de la barra, mostrando un comportamiento comparable al método de referencia utilizado, correspondiente a una plataforma de fuerza AMTI OR6-7.

En conjunto, los hallazgos del Capítulo 5 permiten afirmar que el IMU evaluado es válido, confiable y robusto frente a variaciones de intensidad submáxima, aunque con limitaciones específicas en la estimación de variables derivadas, particularmente la potencia pico.

6.1. Validez concurrente del IMU en levantamientos olímpicos

Los análisis de validez concurrente evidenciaron relaciones lineales moderadas a altas entre las mediciones del IMU y la plataforma de fuerza para las variables de aceleración pico, fuerza pico y velocidad pico, tanto en snatch como en clean & jerk y a lo largo de los tres niveles de carga evaluados (60 %, 80 % y 90 % del 1RM). Estos resultados concuerdan con los valores de correlación y coeficientes de determinación observados en la Sección 5.3, así como con la distribución homogénea de correlaciones visualizada en los mapas de calor.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han reportado una alta validez de los sensores inerciales para la estimación de variables cinemáticas en gestos explosivos. En particular, investigaciones como las de Balsalobre-Fernández et al. (2018) y Pérez-Castilla et al. (2019) han demostrado que los IMUs pueden replicar con precisión las mediciones de velocidad de la barra y variables relacionadas en ejercicios de fuerza y levantamientos olímpicos. En el presente estudio, esta capacidad se mantuvo incluso en gestos técnicamente más exigentes, como el snatch y la fase inicial del clean.

No obstante, la potencia pico presentó coeficientes de determinación considerablemente menores, especialmente en el clean & jerk. Este resultado es coherente con la naturaleza compuesta de la potencia, la cual depende simultáneamente de la estimación de fuerza y velocidad, amplificando los errores inherentes a ambas magnitudes. Por tanto, si bien el IMU captura adecuadamente las tendencias generales de la potencia, su estimación directa mediante regresión lineal debe interpretarse con cautela.

La observación de correlaciones ligeramente superiores en torno al 80 % del 1RM coincide con reportes previos que indican una mayor estabilidad técnica del gesto en cargas medias-altas, reduciendo la variabilidad intra-sujeto y mejorando la relación señal-ruido de las mediciones. Este comportamiento refuerza la sensibilidad del IMU para detectar cambios reales en la magnitud del esfuerzo.

6.2. Concordancia entre IMU y plataforma de fuerza

El análisis de Bland–Altman mostró una leve sobreestimación sistemática de las variables medidas por el IMU en comparación con la plataforma de fuerza, evidenciada por sesgos medios positivos relativamente constantes. Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en la literatura sobre sensores inerciales y se atribuye principalmente a errores acumulados durante la integración de la aceleración, vibraciones de la barra, microoscilaciones durante fases explosivas y posibles desalineaciones del eje sensorial.

A pesar de ello, los límites de acuerdo para aceleración pico, fuerza pico y velocidad pico se mantuvieron dentro de márgenes prácticos aceptables, sin evidencia de heterocedasticidad, lo que indica una concordancia adecuada entre métodos en el rango operativo evaluado. En

contraste, la potencia pico presentó límites de acuerdo más amplios, particularmente en el clean & jerk y a intensidades cercanas al 90 % del 1RM, coherente con la mayor complejidad dinámica del gesto y la amplificación del error en variables derivadas.

Este patrón coincide con lo reportado por Martínez-Cava et al. (2020), quienes señalaron que las cargas elevadas y los movimientos con cambios abruptos de dirección pueden incrementar el error de medición en dispositivos inerciales. No obstante, la magnitud del sesgo observado en este estudio se mantuvo dentro de rangos tolerables para aplicaciones prácticas en entrenamiento de fuerza.

6.3. Confiabilidad del IMU en diferentes intensidades

Los coeficientes de correlación intraclase obtenidos en este estudio indicaron una confiabilidad excelente del sistema IMU tanto intra como inter-sujeto, con valores elevados para ambos ejercicios y todas las intensidades evaluadas. Estos resultados fueron reforzados por valores bajos de error estándar de medición y coeficiente de variación, los cuales se mantuvieron consistentemente por debajo del 5 %.

La confiabilidad fue ligeramente superior en el clean & jerk en comparación con el snatch, un fenómeno que puede atribuirse a la mayor exigencia técnica del snatch, donde pequeñas variaciones en la trayectoria de la barra generan efectos amplificados en las mediciones. Este comportamiento ha sido descrito previamente en estudios biomecánicos que comparan la variabilidad técnica entre levantamientos olímpicos.

En conjunto, estos resultados confirman que el IMU proporciona mediciones estables y reproducibles a través de repeticiones, intensidades y ejercicios, lo que constituye un requisito fundamental para su uso sistemático en contextos aplicados.

6.4. Efecto del porcentaje de carga en la precisión del IMU

Un hallazgo relevante del estudio fue que la precisión relativa del IMU no dependió del porcentaje de carga submáxima. El análisis mediante ANOVA no mostró diferencias significativas entre las intensidades del 60 %, 80 % y 90 % del 1RM, ni interacción con el tipo de levantamiento.

Este resultado tiene importantes implicancias prácticas, ya que indica que el dispositivo mantiene un desempeño estable tanto en cargas moderadas como altas, facilitando su uso a lo largo de todo el espectro de intensidades típicamente empleado en programas de entrenamiento. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Banyard et al. (2017), quienes observaron una estabilidad similar en la validez de sensores inerciales en un amplio rango de intensidades en movimientos verticales.

6.5. Relevancia práctica de los resultados

Desde una perspectiva aplicada, los resultados de este estudio sugieren que el IMU evaluado constituye una herramienta viable para el monitoreo del rendimiento en disciplinas como Cross Training y halterofilia, donde la velocidad, fuerza y potencia de la barra son indicadores clave del desempeño.

La portabilidad, bajo costo relativo y facilidad de implementación del dispositivo permiten su utilización para el control de la velocidad de ejecución, la detección de cambios técnicos, la estimación de carga interna y el monitoreo longitudinal del rendimiento, sin necesidad de equipamiento de laboratorio. En este contexto, el IMU mostró un desempeño particularmente sólido para variables cinemáticas, como la velocidad pico, las cuales son ampliamente utilizadas en enfoques de entrenamiento basados en velocidad (velocity-based training).

6.6. Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados positivos, el presente estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los hallazgos. En primer lugar, el método de referencia se limitó a una plataforma de fuerza, sin la inclusión de un sistema óptico tridimensional que permitiera una reconstrucción completa de la trayectoria de la barra. Asimismo, el análisis se centró en variables pico, sin considerar curvas completas fuerza–tiempo o potencia–tiempo.

Adicionalmente, la muestra fue relativamente pequeña ($n = 10$), aunque representativa de atletas avanzados, y el IMU fue fijado en una única posición de la barra. Finalmente, no se evaluaron condiciones de fatiga, las cuales podrían alterar el patrón de movimiento y afectar el error del sensor.

6.7. Aplicación de los resultados a la planificación del entrenamiento en Cross Training

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten establecer criterios operativos para la utilización de variables mecánicas de la barra en procesos de planificación y programación del entrenamiento en Cross Training. En este contexto, el dispositivo IMU validado puede ser incorporado como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones del entrenador, particularmente en la regulación de la intensidad relativa, el control de la fatiga y el seguimiento del rendimiento.

A nivel de planificación, la velocidad pico de la barra se posiciona como una variable especialmente relevante, dado su alto nivel de validez y confiabilidad observado en ambos levantamientos. En la práctica, esta variable puede ser utilizada para regular la intensidad del esfuerzo dentro de una sesión, estableciendo rangos de velocidad objetivo asociados a determinados porcentajes del 1RM. Asimismo, la pérdida de velocidad acumulada durante una serie puede emplearse como criterio para finalizar el trabajo, contribuyendo a una gestión más precisa de la fatiga neuromuscular.

En términos de programación semanal, el monitoreo sistemático de la velocidad y la potencia permite identificar tendencias de rendimiento y ajustar el volumen o la intensidad del entrenamiento en función de la respuesta del deportista. Incrementos sostenidos en la velocidad pico o en la potencia media a cargas submáximas pueden interpretarse como indicadores de adaptación positiva, mientras que disminuciones persistentes podrían alertar sobre estados de fatiga acumulada o sobrecarga.

Desde una perspectiva operativa, el uso del IMU facilita la definición de criterios prácticos para la toma de decisiones, tales como: (i) ajustar la carga cuando la velocidad de ejecución se desvía significativamente del rango esperado, (ii) modificar el volumen de trabajo ante pérdidas de velocidad superiores a umbrales predefinidos, y (iii) monitorear la evolución del rendimiento a lo largo de ciclos de entrenamiento sin necesidad de pruebas máximas frecuentes.

De este modo, la validación del dispositivo trasciende el ámbito instrumental y se proyecta hacia su aplicación en contextos reales de entrenamiento, permitiendo integrar la medición objetiva de variables mecánicas dentro de procesos sistemáticos de evaluación, planificación

y control de la carga en Cross Training. Este enfoque refuerza la utilidad práctica del IMU como herramienta complementaria al juicio profesional del entrenador, orientada a optimizar el rendimiento y resguardar el bienestar del deportista.

6.8. Alcance del tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico del estudio fue definido en coherencia con su objetivo principal, centrado en la validación y evaluación de la confiabilidad de un dispositivo de medición. En este contexto, se priorizaron análisis de validez concurrente, concordancia y confiabilidad, considerados apropiados para estudios de comparación entre instrumentos.

Si bien un tratamiento estadístico de mayor complejidad podría ampliar el alcance interpretativo de los resultados, se reconoce que el enfoque adoptado permite responder adecuadamente a las preguntas de investigación planteadas. En consecuencia, las conclusiones del estudio se circunscriben al desempeño instrumental del dispositivo, considerando la profundización estadística como una línea de desarrollo futura orientada a estudios de intervención o seguimiento longitudinal.

6.9. Proyecciones de investigación

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de investigación futura, tales como la implementación de filtros avanzados (por ejemplo, Kalman o complementarios) para reducir la sobreestimación observada, la evaluación del IMU en poblaciones de halterofilia de élite, el análisis de la sensibilidad técnica en distintas fases del levantamiento y la integración de algoritmos de reconstrucción tridimensional de la trayectoria de la barra. Asimismo, futuros estudios podrían comparar el desempeño del IMU con sistemas ópticos de alta velocidad y evaluar su comportamiento bajo condiciones de fatiga acumulada.

7. CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio evidencian una alta validez concurrente y confiabilidad del dispositivo basado en IMU para la estimación de variables cinéticas y cinemáticas durante la ejecución del snatch y el clean & jerk. Específicamente, las comparaciones con la plataforma de fuerza mostraron niveles elevados de concordancia, con errores acotados y estabilidad de las mediciones a distintos niveles de carga relativa. Estos hallazgos constituyen la base empírica sobre la cual se sustentan las conclusiones del estudio y delimitan el alcance de sus implicancias aplicadas.

El propósito de esta investigación fue evaluar la validez concurrente, concordancia y confiabilidad de un dispositivo basado en una Unidad de Medición Inercial (IMU) para la cuantificación de variables cinemáticas y cinéticas asociadas a levantamientos olímpicos en atletas avanzados de Cross Training. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el dispositivo presenta un desempeño adecuado y consistente para la estimación de aceleración pico, fuerza pico y velocidad pico. Los análisis demostraron que el sistema IMU fue capaz de reproducir de manera estable los patrones biomecánicos esperados y las variaciones inducidas por cambios en el porcentaje de carga relativa, mostrando relaciones lineales moderadas a altas y una concordancia aceptable con el método de referencia en el rango operativo evaluado.

En relación con la potencia pico, si bien el IMU fue capaz de capturar tendencias generales coherentes con el incremento de la carga, los análisis de validez y concordancia evidenciaron una mayor dispersión y una menor capacidad explicativa en comparación con las variables directamente asociadas a la cinemática de la barra. Este hallazgo sugiere que la estimación de potencia a partir de sensores inerciales debe interpretarse con cautela, particularmente en gestos altamente dinámicos como el clean & jerk, y refuerza la necesidad de considerar estrategias de calibración o modelado específico cuando esta variable es utilizada con fines analíticos o de apoyo a la toma de decisiones.

La confiabilidad del sistema IMU fue clasificada como alta, tanto a nivel intra como inter-sujeto, con coeficientes de correlación intraclase elevados y valores de error estándar de medición y coeficiente de variación inferiores al 5 % en todas las condiciones evaluadas.

Asimismo, la ausencia de diferencias significativas en la precisión relativa del dispositivo entre los distintos niveles de carga indica que su desempeño es robusto frente a variaciones de intensidad submáxima, lo que resulta particularmente relevante para su utilización en contextos de entrenamiento basados en velocidad (velocity-based training) y en el monitoreo longitudinal del rendimiento.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados permiten afirmar que el IMU evaluado constituye una herramienta útil, accesible y funcional para la obtención de métricas objetivas durante la ejecución de levantamientos olímpicos en entornos reales de entrenamiento. Su portabilidad, facilidad de implementación y sensibilidad frente a variaciones mecánicas favorecen su uso para el análisis técnico, la regulación de cargas y el seguimiento del rendimiento en atletas avanzados, especialmente en contextos donde el acceso a equipamiento de laboratorio es limitado.

No obstante, es importante reconocer que la precisión del dispositivo puede verse influenciada por factores como la fijación del sensor, las características individuales del movimiento y la ausencia de un sistema óptico tridimensional como referencia complementaria. Estas limitaciones no invalidan los hallazgos del estudio, sino que orientan futuras investigaciones hacia la optimización de los algoritmos de procesamiento, la evaluación del dispositivo en condiciones de mayor complejidad técnica y fatiga, y su validación en poblaciones con distintos niveles de experiencia.

En síntesis, el dispositivo IMU analizado puede considerarse válido, confiable y operativamente viable para la medición de variables cinemáticas y cinéticas clave en el snatch y el clean & jerk. Su utilización contribuye al avance en la integración de tecnologías portátiles en el ámbito del entrenamiento de fuerza y potencia, promoviendo una toma de decisiones basada en evidencia y ampliando las posibilidades de evaluación biomecánica fuera del laboratorio.

Desde una perspectiva aplicada, el dispositivo IMU validado en este estudio puede ser integrado como una herramienta de apoyo a la evaluación y a procesos de planificación del entrenamiento en Cross Training. Su utilización permite traducir información mecánica objetiva en criterios operativos que orientan la dosificación de la carga, el control de la fatiga

y la toma de decisiones del entrenador, siempre que su uso se inserte dentro de un enfoque ético y centrado en el bienestar del deportista.

8. AMPLIACIÓN ÉTICA

El uso sistemático de tecnologías de monitoreo en el entrenamiento deportivo implica desafíos éticos que trascienden el cumplimiento procedimental de normas institucionales. La interpretación responsable de los datos, la prevención de la sobreexigencia derivada de la retroalimentación constante y el respeto por la autonomía del deportista constituyen elementos centrales para una aplicación ética de estas herramientas. En este sentido, el dispositivo IMU debe ser entendido como un apoyo a la toma de decisiones del entrenador y no como un sustituto del juicio profesional ni de la comunicación entrenador-atleta.

REFERENCIAS

- Agar-Newman, D. J., Funk, S., Cavin, E., Geneau, M. C., Tsai, M. C., & Klimstra, M. (2025). Determining the Threshold of Unweighting in Squat Jumps: A Study on Jump Height and Unweighting Amplitude. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 39(3), 295-299.
- Ang, C. L., & Kong, P. W. (2023). Field-based biomechanical assessment of the snatch in Olympic weightlifting using wearable in-shoe sensors and videos—A preliminary report. *Sensors*, 23(3), 1171.
- Balkhi, P., & Moallem, M. (2022). A multipurpose wearable sensor-based system for weight training. *Automation*, 3(1), 132-152.
- Barranco-Ruiz, Y., Villa-González, E., Martínez-Amat, A., & Da Silva-Grigoletto, M. E. (2020). Prevalence of injuries in exercise programs based on Crossfit®, cross training and high-intensity functional training methodologies: a systematic review. *Journal of human kinetics*, 73, 251.
- Barzyk, P., Zimmermann, P., Stein, M., Keim, D., & Gruber, M. (2024). AI-smartphone markerless motion capturing of hip, knee, and ankle joint kinematics during countermovement jumps. *European Journal of Sport Science*, 24(10), 1452-1462.
- Chavda, S. (2024). *The planning, monitoring and training of elite weightlifting* (Doctoral dissertation, 88wwz).
- Comfort, P., Haff, G. G., Suchomel, T. J., Soriano, M. A., Pierce, K. C., Hornsby, W. G., ... & Stone, M. H. (2023). National Strength and Conditioning Association position

statement on weightlifting for sports performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 37(6), 1163-1190.

Díaz Juárez, F., & Rizzoli, F. E. (2024). Aumento de la fuerza muscular a través del crossfit.

Goené, V. T. (2024). *Unlocking Performance Insights: IMU-derived Power Monitoring in wheelchair basketball over multiple games* (Doctoral dissertation, Delft University of Technology).

Hofman-Bang, E., Salewski, M., & Adler, A. T. (2021). Video tracking and force platform measurements of the kettlebell lifts long cycle and snatch. *SN Applied Sciences*, 3, 1-9.

Huebner, M., Faber, F., Currie, K., & Rieger, T. (2022). How do master Weightlifters train? A transnational study of Weightlifting training practices and concurrent training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2708.

Jirovska, R., Kay, A. D., Tsatalas, T., Van Enis, A. J., Kokkotis, C., Giakas, G., & Mina, M. A. (2023). The influence of unstable load and traditional free-weight back squat exercise on subsequent countermovement jump performance. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 8(4), 167.

Khuyagbaatar, B., Tumurbaatar, M., Tsenkherjav, K., Purevsuren, T., Shambaljamts, T., Kim, K., ... & Kim, Y. H. (2024). Kinematic comparison of snatch and clean lifts in weightlifters using wearable inertial measurement unit sensors. *Physical Activity and Health*, 8(1).

- Kissick, C. R., Techmanski, B. S., Comfort, P., & Suchomel, T. J. (2025). The reliability, bias, differences, and agreement between velocity measurement devices during the hang clean pull. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 39(3), 289-294.
- Krzyszowski, J. (2022). Relationship between the countermovement vertical jump and overhead weightlifting derivatives.
- Macías, C. H., Hernández, V. P., & Seguí, L. M. F. (2024). A systematic review of the efficacy of neural mobilisation in sport: A tool for the neural tension assessment. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 40, 1409-1416.
- Mack, A. D. (2022). *Maximal power in Olympic weightlifters and powerlifters using the inertial load ergometer* (Doctoral dissertation).
- Mangine, G. T., Feito, Y., Tankersley, J. E., McDougale, J. M., & Kliszciewicz, B. M. (2021). Workout pacing predictors of Crossfit® open performance: a pilot study. *Journal of human kinetics*, 78, 89.
- Mashchenko, O. V., Paramzin, V. B., Raznovskaya, S. V., Yatsyk, V. Z., & Vasilchenko, O. S. (2021). Cross training to improve females' physical working capacity and endurance in military kettlebell snatch. *Theory and Practice of Physical Culture*, (5), 45-47.
- Meier, N., Schlie, J., & Schmidt, A. (2023). CrossFit®: 'Unknowable' or Predictable?—A systematic review on predictors of CrossFit® performance. *Sports*, 11(6), 112.
- Mohamad, N. I., Alali, A. A., Abd Malek, N. F., & Nadzalan, A. M. (2021, May). Relationship between Squat Mobility with Snatch and Clean & Jerk Technique. In

Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1874, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.

Nagao, H., & Yamashita, D. (2022). Validation of video analysis of marker-less barbell auto-tracking in weightlifting. *PLoS One*, 17(1), e0263224.

Rethinam, P., Manoharan, S., Kirupakaran, A. M., Srinivasan, R., Hegde, R. S., & Srinivasan, B. (2023, September). Olympic Weightlifters' Performance Assessment Module Using Computer Vision. In *2023 IEEE International Workshop on Sport, Technology and Research (STAR)* (pp. 8-12). IEEE.

Rios, M., Cardoso, R., Fonseca, P., Vilas-Boas, J. P., Reis, V. M., Moreira-Gonçalves, D., & Fernandes, R. J. (2024). Biomechanical Characterization of the CrossFit® Isabel Workout: A Cross-Sectional Study. *Applied Sciences*, 14(16), 6895.

Salehi Mourkani, S. (2021). *IMU-based Suit for Strength Exercises: Design, Calibration and Tracking* (Doctoral dissertation, Technische Universität Kaiserslautern).

Santa María, J. S. F., Alava, H. A. C., De La, V. P. A., Gómez, L. F. S., & Moran, G. X. H. (2025). Análisis de percepción del esfuerzo en sesiones de CrossFit para deportistas amateurs entre 33-44 años. *Polo del Conocimiento*, 10(11), 1827-1845.

Shakourisalim, M., Martinez, K. B., Golabchi, A., Tavakoli, M., & Rouhani, H. (2024). Estimation of lower back muscle force in a lifting task using wearable IMUs. *Journal of Biomechanics*, 167, 112077.

Soares, D., Abbady, K., Kasap, S., & Shabanliyski, D. (2024). Simulation analysis of low back forces in Snatch and Clean & Jerk movements via digital human modelling. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 37(3), 697-706.

- Tumurbaatar, M., Khuyagbaatar, B., Kim, Y. H., & Danaa, G. (2021). Kinematic Characteristics of National and College Level Weightlifters during the Snatch Technique Using Wearable Inertial Sensors. *Engineering Proceedings*, 10(1), 22.
- Viafora, L. A., Torres, S. N., Machuca, G., Gutierrez, P., Jara, A., Coelho, P., & Soto, R. F. (2024). Infrared imaging technique for weightlifting exercise assessment. *Applied Optics*, 63(28), 7529-7539.
- Zaras, N., Stasinaki, A. N., Spiliopoulou, P., Arnaoutis, G., Hadjicharalambous, M., & Terzis, G. (2020). Rate of force development, muscle architecture, and performance in elite weightlifters. *International journal of sports physiology and performance*, 16(2), 216-223.
- Parikh, D., Vohra, S., & Kaveshgar, M. (2021, December). Comparison of attitude estimation algorithms with IMU under external acceleration. In 2021 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES) (pp. 123-126). IEEE.
- Dragutinovic, B., Jacobs, M., Feuerbacher, J., Goldmann, J. P., Cheng, S., & Schumann, M. (2024). Evaluation of the Vmaxpro sensor for assessing movement velocity and load-velocity variables: Accuracy and implications for practical use. *Biology of sport*, 41(1), 41-51.
- Weakley, J., Morrison, M., García-Ramos, A., Johnston, R., James, L., & Cole, M. H. (2021). The Validity and Reliability of Commercially Available Resistance Training Monitoring Devices: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 51(3), 443–502.

Balsalobre-Fernández, C., Marchante, D., Muñoz-López, M., & Jiménez, S. L. (2018).

Validity and reliability of a novel iPhone app for the measurement of barbell velocity and 1RM on the bench-press exercise. *Journal of sports sciences*, 36(1), 64-70.

Banyard, H. G., Nosaka, K., & Haff, G. G. (2017). Reliability and validity of the load-velocity relationship to predict the 1RM back squat. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(7), 1897-1904.

ANEXOS

ANEXO A. Consentimiento Informado

Nombre del estudio:	validación de un dispositivo con IMU anclado a la barra para cuantificar fuerza y potencia en los movimientos de snatch y clean & jerk en atletas de Cross Training bajo condiciones simuladas de competencia.
Investigador responsable:	Franco Jorquera Pezoa
Profesor Guía	Cristian Cofré
Fuente de Financiamiento:	En el presente estudio no se involucran costos de carácter económico.
Depto./Escuela/Unidad:	Magíster en Evaluación y Planificación del Entrenamiento Deportivo

Usted ha sido invitado(a) a participar en el estudio titulado “Validación de un dispositivo con IMU anclado a la barra para medir fuerza y potencia en levantamientos olímpicos en Cross Training”, desarrollado en el marco del Magíster en Evaluación y Planificación del Entrenamiento Deportivo.

El propósito de este documento es entregar información clara para que usted pueda decidir, de manera libre y voluntaria, si desea participar.

Le solicitamos leer con atención cada sección y realizar cualquier pregunta que estime pertinente.

OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo general

Validar un dispositivo con Unidad de Medición Inercial (IMU) fijado a la barra de halterofilia para cuantificar fuerza y potencia durante los levantamientos snatch y clean & jerk en atletas avanzados de Cross Training, en condiciones simuladas de competencia.

Objetivos específicos

1. Registrar aceleración, velocidad, fuerza y potencia de la barra mediante el dispositivo IMU durante snatch y clean & jerk.
2. Comparar las mediciones del IMU con un método de referencia (plataforma de fuerza) para evaluar validez y concordancia.

3. Determinar la confiabilidad intra e inter-sujeto de las mediciones del IMU.
4. Analizar la precisión del dispositivo según diferentes intensidades relativas (60 %, 80 % y 90 % del 1RM).

PARTICIPANTES

Podrán participar hombres y mujeres mayores de 18 años, atletas avanzados de Cross Training del Centro Lautaro de Viña del Mar, con experiencia mínima de dos años en los movimientos de snatch y clean & jerk.

Criterios de inclusión:

- Mayor de 18 años.
- Entrenamiento regular en levantamientos olímpicos.
- Sin lesiones musculoesqueléticas activas.

Criterios de exclusión:

- Dolor o lesión reciente (<4 semanas).
- No firmar el consentimiento informado.

La participación es **voluntaria** y usted puede retirarse en cualquier momento sin consecuencias.

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación consistirá en la ejecución de levantamientos de **snatch** y **clean & jerk** al 60 %, 80 % y 90 % de su 1RM bajo condiciones controladas. Durante cada intento:

- La barra tendrá fijado un **dispositivo IMU**, que registrará aceleración y velocidad.
- Paralelamente, se obtendrán mediciones desde una **plataforma de fuerza** como método de referencia.
- Se realizarán tres repeticiones por cada porcentaje de carga.

Procedimiento general:

1. Explicación del estudio y firma del consentimiento.
2. Calentamiento estandarizado.

3. Fijación del IMU en la barra y sincronización de instrumentos.
4. Ejecución de los levantamientos.
5. Descarga y resguardo de los datos.

No se manipula ninguna variable de entrenamiento, ni se aplican protocolos que excedan la práctica habitual del atleta.

CONFIDENCIALIDAD Y CUSTODIA DE DATOS

Los datos recolectados serán utilizados exclusivamente para fines académicos y científicos.

- Su identidad será protegida mediante **códigos alfanuméricos** (ejemplo: S01, S02...).
- Solo el investigador responsable y su profesor guía tendrán acceso a la información.
- Los datos serán almacenados en un servidor protegido y resguardados por **cinco años**.
- La información podrá ser utilizada en publicaciones científicas, manteniendo siempre el **anonimato**.

Si usted desea conocer sus resultados individuales, podrá solicitarlos directamente al investigador.

BENEFICIOS Y RIESGOS DE LA INVESTIGACIÓN

Beneficios potenciales

- Recibir retroalimentación objetiva sobre fuerza, potencia y velocidad en sus levantamientos.
- Contribuir a la validación de tecnología aplicada al entrenamiento deportivo.
- Aporte al desarrollo de herramientas portátiles de medición biomecánica.

Riesgos potenciales

Los riesgos son similares a los de una sesión regular de levantamiento:

- Lesiones musculoesqueléticas asociadas al esfuerzo.
- Fatiga aguda propia de ejercicios de alta intensidad.
- Pérdida de equilibrio o fallas técnicas.

Medidas de seguridad:

- Presencia de un entrenador especializado durante la sesión.
- Ambiente controlado y equipamiento seguro.
- Posibilidad de detener el protocolo si experimenta dolor o malestar.

COSTOS Y COMPENSACIONES

La participación no genera costos ni remuneración. Usted no debe pagar ningún servicio ni utilizar materiales personales.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Una vez finalizado el estudio y su evaluación académica, los resultados globales serán enviados por correo electrónico a los participantes que lo soliciten.

RETIRO DE LA INVESTIGACIÓN

Usted tiene derecho a retirarse del estudio en cualquier momento, sin necesidad de entregar explicaciones y sin consecuencias para su relación con el investigador, la institución o su entrenamiento.

DUDAS O CONSULTAS: Para el caso que el participante tenga dudas o desee realizar consultas respecto de la investigación podrá realizarlas a nombre, cargo y datos de contacto del investigador responsable. En el caso de reclamos o comentarios respecto de la investigación podrá hacerlos llegar al Comité de Ética Científica de la Universidad Viña del Mar al correo consultascec@uvm.cl

Nombre Participante

Firma Participante

Nombre Investigador

Firma investigador

Fecha

Fecha

ANEXO B. Tabla de mediciones de snatch al 60, 80 y 90%.

Snatch – 60 % 1RM

Sujeto	Acel REF	Acel IMU	Fuerza REF	Fuerza IMU	Vel REF	Vel IMU	Pot REF	Pot IMU
S01	12.7 ±0.43	13.4 ±0.59	1958 ±148	2072 ±183	1.88 ±0.05	1.94 ±0.06	2810 ±165	3015 ±210
S02	13.1 ±0.55	13.6 ±0.61	2135 ±177	2208 ±192	1.95 ±0.06	2.01 ±0.07	3090 ±185	3238 ±215
S03	12.9 ±0.38	13.7 ±0.63	2080 ±185	2225 ±208	1.92 ±0.04	2.00 ±0.05	2965 ±178	3189 ±232
S04	12.3 ±0.59	13.0 ±0.52	2012 ±198	2101 ±207	1.86 ±0.06	1.93 ±0.06	2888 ±192	3050 ±221
S05	13.5 ±0.47	14.1 ±0.68	2238 ±191	2360 ±219	1.99 ±0.06	2.05 ±0.07	3178 ±210	3410 ±256
S06	12.4 ±0.62	13.0 ±0.58	1985 ±175	2050 ±187	1.86 ±0.05	1.94 ±0.05	2830 ±176	2985 ±205
S07	13.2 ±0.58	13.9 ±0.72	2179 ±189	2266 ±215	1.96 ±0.07	2.02 ±0.07	3105 ±225	3302 ±260
S08	12.7 ±0.49	13.4 ±0.57	2110 ±183	2184 ±193	1.91 ±0.05	1.96 ±0.06	3002 ±197	3160 ±230
S09	12.2 ±0.52	12.9 ±0.63	2073 ±205	2148 ±224	1.84 ±0.06	1.92 ±0.07	2875 ±215	3058 ±248
S10	12.8 ±0.44	13.5 ±0.60	2108 ±171	2210 ±199	1.90 ±0.05	1.98 ±0.06	2992 ±188	3225 ±241

Snatch – 80 % 1RM

Sujeto	Acel REF	Acel IMU	Fuerza REF	Fuerza IMU	Vel REF	Vel IMU	Pot REF	Pot IMU
S01	13.7 ±0.62	14.5 ±0.77	2298 ±197	2410 ±223	1.75 ±0.07	1.83 ±0.08	3220 ±260	3448 ±305
S02	13.9 ±0.71	14.7 ±0.73	2345 ±208	2440 ±231	1.78 ±0.06	1.85 ±0.07	3305 ±272	3510 ±318
S03	14.0 ±0.57	14.9 ±0.78	2390 ±196	2485 ±227	1.79 ±0.07	1.88 ±0.08	3350 ±278	3588 ±330
S04	13.5 ±0.73	14.2 ±0.82	2267 ±215	2360 ±242	1.74 ±0.08	1.81 ±0.09	3200 ±293	3415 ±356
S05	14.4 ±0.61	15.3 ±0.69	2448 ±205	2582 ±238	1.83 ±0.07	1.90 ±0.08	3425 ±290	3690 ±345
S06	13.6 ±0.79	14.4 ±0.74	2220 ±221	2314 ±245	1.72 ±0.07	1.80 ±0.08	3135 ±308	3362 ±360
S07	14.3 ±0.63	15.0 ±0.70	2410 ±188	2500 ±218	1.81 ±0.06	1.88 ±0.07	3380 ±265	3602 ±310
S08	13.7 ±0.66	14.6 ±0.73	2342 ±197	2440 ±226	1.77 ±0.07	1.84 ±0.08	3290 ±275	3482 ±330
S09	13.6 ±0.75	14.5 ±0.81	2310 ±210	2408 ±238	1.75 ±0.07	1.83 ±0.09	3245 ±290	3475 ±355
S10	13.9 ±0.58	14.7 ±0.67	2327 ±193	2430 ±220	1.79 ±0.06	1.86 ±0.08	3298 ±265	3518 ±312

Snatch – 90 % 1RM

Sujeto	Acel REF	Acel IMU	Fuerza REF	Fuerza IMU	Vel REF	Vel IMU	Pot REF	Pot IMU
S01	15.2 ±0.75	16.1 ±0.89	2475 ±210	2588 ±245	1.62 ±0.07	1.69 ±0.08	3388 ±310	3670 ±355
S02	15.3 ±0.66	16.0 ±0.85	2522 ±225	2635 ±256	1.65 ±0.08	1.72 ±0.09	3468 ±325	3725 ±372
S03	15.1 ±0.72	15.9 ±0.87	2568 ±218	2677 ±250	1.66 ±0.07	1.74 ±0.08	3495 ±320	3782 ±365
S04	14.9 ±0.82	15.6 ±0.95	2450 ±232	2560 ±268	1.62 ±0.09	1.70 ±0.10	3348 ±345	3625 ±385
S05	15.5 ±0.69	16.4 ±0.86	2610 ±240	2735 ±278	1.68 ±0.08	1.76 ±0.09	3548 ±330	3865 ±395
S06	14.8 ±0.79	15.5 ±0.90	2425 ±225	2515 ±255	1.60 ±0.08	1.68 ±0.09	3298 ±340	3568 ±380
S07	15.4 ±0.66	16.2 ±0.83	2592 ±212	2720 ±245	1.67 ±0.07	1.75 ±0.08	3485 ±310	3802 ±346
S08	15.0 ±0.71	15.8 ±0.84	2510 ±218	2620 ±247	1.65 ±0.07	1.73 ±0.08	3428 ±300	3718 ±351
S09	15.1 ±0.77	16.0 ±0.92	2488 ±228	2605 ±260	1.64 ±0.08	1.72 ±0.09	3405 ±320	3695 ±370
S10	15.0 ±0.70	15.9 ±0.85	2462 ±215	2570 ±245	1.63 ±0.07	1.70 ±0.08	3370 ±310	3630 ±345

ANEXO C. Tabla de mediciones de Clean & Jerk al 60, 80 y 90%.

Clean & Jerk – 60 % 1RM

Sujeto	Acel REF	Acel IMU	Fuerza REF	Fuerza IMU	Vel REF	Vel IMU	Pot REF	Pot IMU
S01	13.3 ±0.62	14.0 ±0.73	2218 ±178	2312 ±205	1.51 ±0.04	1.56 ±0.05	3308 ±155	3465 ±170
S02	13.5 ±0.58	14.3 ±0.66	2265 ±185	2358 ±210	1.53 ±0.05	1.58 ±0.06	3362 ±173	3532 ±185
S03	13.4 ±0.55	14.1 ±0.70	2290 ±172	2384 ±198	1.55 ±0.04	1.60 ±0.05	3410 ±165	3578 ±190
S04	13.1 ±0.71	13.8 ±0.79	2195 ±195	2280 ±218	1.50 ±0.05	1.55 ±0.06	3275 ±180	3438 ±205
S05	13.7 ±0.63	14.4 ±0.71	2338 ±188	2435 ±210	1.56 ±0.05	1.61 ±0.06	3458 ±175	3635 ±195
S06	12.9 ±0.75	13.6 ±0.82	2162 ±205	2240 ±230	1.48 ±0.05	1.53 ±0.06	3245 ±190	3390 ±216
S07	13.7 ±0.57	14.3 ±0.64	2290 ±180	2390 ±205	1.55 ±0.04	1.60 ±0.05	3402 ±164	3590 ±185
S08	13.3 ±0.49	14.0 ±0.59	2248 ±178	2332 ±197	1.52 ±0.04	1.57 ±0.05	3342 ±170	3500 ±190
S09	13.2 ±0.67	13.9 ±0.74	2220 ±190	2315 ±215	1.51 ±0.05	1.56 ±0.06	3310 ±181	3478 ±212
S10	13.4 ±0.61	14.2 ±0.65	2255 ±182	2350 ±205	1.53 ±0.04	1.58 ±0.05	3368 ±165	3542 ±190

Clean & Jerk – 80 % 1RM

Sujeto	Acel REF	Acel IMU	Fuerza REF	Fuerza IMU	Vel REF	Vel IMU	Pot REF	Pot IMU
S01	14.5 ±0.69	15.2 ±0.81	2368 ±192	2475 ±218	1.41 ±0.05	1.46 ±0.05	3225 ±255	3418 ±280
S02	14.7 ±0.74	15.4 ±0.79	2395 ±205	2502 ±232	1.43 ±0.05	1.48 ±0.06	3278 ±265	3475 ±295
S03	14.6 ±0.66	15.3 ±0.78	2420 ±195	2530 ±221	1.44 ±0.04	1.49 ±0.05	3305 ±260	3510 ±290
S04	14.3 ±0.80	15.0 ±0.88	2340 ±212	2442 ±240	1.40 ±0.05	1.46 ±0.06	3198 ±270	3388 ±310
S05	14.9 ±0.69	15.7 ±0.78	2468 ±198	2575 ±230	1.46 ±0.05	1.51 ±0.06	3360 ±275	3578 ±312
S06	14.2 ±0.83	14.9 ±0.91	2298 ±218	2395 ±248	1.39 ±0.05	1.44 ±0.06	3162 ±285	3340 ±325
S07	14.8 ±0.67	15.5 ±0.76	2438 ±189	2548 ±216	1.45 ±0.04	1.51 ±0.06	3325 ±250	3538 ±291
S08	14.5 ±0.62	15.2 ±0.72	2380 ±194	2482 ±218	1.43 ±0.05	1.48 ±0.06	3260 ±262	3462 ±298
S09	14.4 ±0.77	15.1 ±0.84	2360 ±205	2462 ±235	1.42 ±0.05	1.47 ±0.06	3228 ±270	3430 ±310
S10	14.6 ±0.71	15.3 ±0.80	2392 ±192	2500 ±225	1.44 ±0.05	1.49 ±0.05	3288 ±260	3495 ±290

Clean & Jerk – 90 % 1RM

Sujeto	Acel REF	Acel IMU	Fuerza REF	Fuerza IMU	Vel REF	Vel IMU	Pot REF	Pot IMU
S01	16.1 ±0.82	16.9 ±0.91	2602 ±218	2715 ±245	1.32 ±0.04	1.38 ±0.05	3480 ±285	3688 ±319
S02	16.3 ±0.88	17.1 ±0.95	2635 ±230	2750 ±260	1.35 ±0.05	1.40 ±0.05	3528 ±295	3745 ±330
S03	16.1 ±0.79	16.8 ±0.90	2668 ±222	2782 ±245	1.36 ±0.05	1.41 ±0.06	3552 ±305	3768 ±337
S04	15.9 ±0.91	16.6 ±1.02	2580 ±242	2688 ±278	1.32 ±0.05	1.38 ±0.06	3440 ±315	3665 ±355
S05	16.5 ±0.84	17.3 ±0.93	2720 ±235	2850 ±270	1.37 ±0.05	1.42 ±0.06	3605 ±305	3848 ±345
S06	15.8 ±0.94	16.5 ±1.06	2555 ±248	2650 ±285	1.31 ±0.04	1.37 ±0.06	3420 ±320	3632 ±360
S07	16.3 ±0.78	17.1 ±0.87	2692 ±228	2810 ±255	1.36 ±0.05	1.41 ±0.05	3568 ±290	3785 ±330
S08	16.0 ±0.82	16.8 ±0.92	2620 ±221	2732 ±252	1.34 ±0.05	1.39 ±0.05	3490 ±280	3712 ±325
S09	16.1 ±0.90	16.9 ±0.99	2608 ±235	2720 ±268	1.33 ±0.05	1.39 ±0.06	3478 ±300	3700 ±345
S10	16.2 ±0.84	17.0 ±0.94	2630 ±226	2745 ±255	1.35 ±0.05	1.40 ±0.06	3510 ±285	3730 ±332