



Análisis de acuerdo entre la observación de vídeo y un sistema inercial para registrar cambios de dirección en una tarea de fútbol ¿son equiparables?

Agreement analysis between video observation and an inertial system for recording changes of direction in a soccer task: are they comparable?

Autores

Roberto Avilés Vicente ¹
José Pino-Ortega ²
Julen Castellano ¹

¹ Universidad del País Vasco
(España)

² Universidad de Murcia (España)

Autor de correspondencia:
Roberto Avilés Vicente
roberto_aviles1990@hotmail.com

Recibido: 10-08-25
Aceptado: 04-04-26

Cómo citar en APA

Avilés Vicente, R., Pino-Ortega, J., & Castellano, J. (2026). Análisis de acuerdo entre la observación de vídeo y un sistema inercial para registrar cambios de dirección en una tarea de fútbol ¿son equiparables?. *Retos*, 79, 522-535. <https://doi.org/10.47197/retos.v79.117377>

Resumen

Introducción: la microtecnología aplicada al deporte ha permitido mejorar la comprensión de las demandas físicas del entrenamiento y la competición en deportes como el fútbol.

Objetivo: analizar el acuerdo entre la observación de vídeo y un sistema de medición inercial (IMU), para la detección de cambios de dirección (COD) en una tarea de fútbol.

Metodología: dieciséis jugadores profesionales fueron monitorizados mediante dispositivos WIMU (RealTrack Systems, Almería, Spain) y grabados con un drone, durante una tarea de 8 contra 8. Los COD se clasificaron según angulación (0–90° y 90°–180°) y dirección (izquierda y derecha). La intensidad mínima (1.0, 0.9 y 0.8 G) y el % de suavizado de la señal (%S30 y %S40), sirvieron para filtrar la señal de IMU. Se aplicaron correlaciones de Pearson, coeficientes de correlación intraclase (ICC) y análisis de Bland–Altman para evaluar la asociación y el grado de acuerdo entre métodos.

Resultados: se hallaron correlaciones moderadas-altas ($r = 0.511-0.843$) y una fiabilidad que osciló entre baja-moderada y alta (ICC = 0.61–0.853). Las diferencias entre ambos métodos fueron moderadas a grandes en los COD de 0°–90° y 90°–180° ($d = 1.68-3.1$) ($p < 0.05$).

Discusión: IMU presenta limitaciones relevantes para estimar con precisión la angulación del gesto debido a sesgos y amplios intervalos de confianza.

Conclusiones: El sistema IMU mostró limitaciones en la detección de cambios de dirección y no es completamente intercambiable con el método de referencia basado en vídeo.

Palabras clave

Deporte de equipo; concordancia; método observacional; microtecnología; movimiento.

Abstract

Introduction: Microtechnology has improved the understanding of training and match demands in team sports such as soccer.

Objective: To analyze the agreement between video observation and an inertial measurement unit (IMU) system for detecting changes of direction (COD) during a soccer task.

Methods: sixteen professional players were monitored using WIMU devices (RealTrack Systems, Almería, Spain) and recorded with a drone during an 8 vs 8 task. CODs were classified by angle (0–90° and 90–180°) and direction (left and right). Minimum intensity thresholds (1.0, 0.9, and 0.8 G) and signal smoothing (%S30 and %S40) were used to filter the IMU signal. Pearson correlation coefficients, intraclass correlation coefficients (ICC), and Bland–Altman analyses were performed to assess the association and level of agreement between methods.

Results: Moderate-to-high correlations were found ($r = 0.511-0.843$), with reliability ranging from low-moderate to high (ICC = 0.61–0.853). Differences between methods were from moderate to large for COD at 0–90° and at 90–180° ($d = 1.68-3.1$) ($p < 0.05$).

Discussion: The IMU exhibited limitations in accurately estimating the COD angle, with systematic bias and wide confidence intervals.

Conclusions: The IMU system showed limitations in detecting changes of direction and is not fully interchangeable with the video-based reference method.

Keywords

Team sport; concordance; observational method; microtechnology; movement.

Introducción

En el contexto deportivo el cambio de dirección (COD) se define como la habilidad para desacelerar, controlar el cuerpo y acelerar en una nueva dirección de manera eficiente y rápida (Sheppard et al., 2006). En deportes intermitentes y multidireccionales como el fútbol, más del 85% de los movimientos se realizan de manera no lineal (Bloomfield et al., 2007), siendo la segunda acción más habitual antes del gol (Martínez-Hernández et al., 2023). Por ello, jugadores con mayor capacidad de cambiar de dirección, suelen tener mejores resultados en acciones específicas de juego como el dribbling, pressing o recuperación (Sheppard et al., 2006). Algunos autores (Chaouachi et al., 2012; Little & Williams, 2005), incluso, lo llegan a proponer como un factor predictivo del rendimiento en el fútbol profesional. Sin embargo, han sido muy pocos los estudios que se han centrado en cuantificar este tipo de movimiento en competición, y las conclusiones extraídas de la literatura existente muestran una gran variabilidad e inconsistencia. Esto puede ser debido, al empleo de diferentes métodos y tecnologías para la detección del COD, la inclusión o exclusión de criterios para su registro o la aplicación de los estudios en diferentes poblaciones.

En relación con la metodología observacional, la definición del flujo de decisión empleado para el registro de los cambios de dirección (COD) condiciona de manera directa los resultados obtenidos (Bloomfield et al., 2007; Morgan et al., 2022; Robinson & O'Donoghue, 2008). La literatura evidencia una notable variabilidad en el número de COD reportados por jugador, con rangos amplios entre estudios. Así, Morgan et al. (2021) estimaron aproximadamente 305 ± 50 COD por jugador en competición U19, mientras que Bloomfield et al. (2007), mediante metodología observacional en la English Premier League, reportaron valores de 726 ± 203 COD por jugador. En contraste, investigaciones basadas en tecnologías instrumentales han mostrado cifras considerablemente inferiores, como 183 ± 39 COD mediante Local Positioning System (LPS) (Kai et al., 2021), entre 20 y 40 COD mediante Light Detection and Ranging (LIDAR) (Dos'Santos et al., 2022), o entre 81 y 107 COD utilizando sistemas de seguimiento óptico (Deutsch et al., 2024). Esta heterogeneidad no parece explicarse únicamente por diferencias en el contexto competitivo, sino que se ha relacionado en gran medida con diversos factores metodológicos y de instrumentación que influyen en la detección de los eventos. Entre ellos, los criterios operacionales utilizados para definir un COD, especialmente el umbral angular adoptado, pueden condicionar la sensibilidad del registro, de modo que valores más bajos tienden a incluir cambios de trayectoria de menor magnitud, mientras que criterios más restrictivos recogen principalmente acciones más pronunciadas. Asimismo, la aplicación de umbrales cinemáticos, como valores mínimos de velocidad o aceleración, puede limitar la inclusión de movimientos de baja intensidad, afectando al número total de eventos registrados. Por otro lado, las características de los sistemas de medición empleados, en términos de resolución espacial y frecuencia de muestreo, pueden influir en la capacidad para captar variaciones rápidas en la orientación del movimiento, especialmente en acciones de corta duración. Del mismo modo, los algoritmos de detección y los procedimientos de procesamiento de señal como el filtrado de los datos alteran la trayectoria reconstruida del jugador, afectando a la identificación de los COD. Además del número y angulación del COD, estudios recientes en nuevas líneas de investigación, han prestado atención al tiempo de duración del COD durante el juego real (Granero-Gil et al., 2020; Kai et al., 2021b) así como a la velocidad de entrada al COD (Deutsch et al., 2024; Dos'Santos et al., 2022), como variables mecánicas influyentes en el rendimiento final del movimiento.

En los últimos años, la inclusión en el deporte de microtecnología que incorpora Inertial Measurement Units (IMUs), ha permitido analizar diferentes movimientos con moderada validez, convirtiéndose en un complemento al sistema de localización habitual de los Sistemas Globales de Seguimiento o GPS (Chambers et al., 2015; Camomilla et al., 2018). Variables como la aceleración total del jugador o Player Load (Chambers et al., 2015), colisiones (Reardon et al., 2017) o saltos (MacDonald et al., 2017; Benson et al., 2020), han permitido incorporar otras dimensiones a la monitorización locomotora del jugador. Aunque esta tecnología presenta ventajas en relación con otras metodologías de registro, como es la facilidad en su implementación diaria en entrenamiento como en partido, puede presentar algunas limitaciones (Kalman, 1960; Luinge & Veltink, 2005; Sabatini, 2005, 2011). Por ejemplo, para obtener con precisión, la orientación espacio-temporal de un cuerpo, se precisa fusionar la información obtenida de varias unidades de medida inercial procedentes de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, teniendo que ser procesada posteriormente mediante diferentes algoritmos (Kalman, 1960; Luinge & Veltink, 2005; Sabatini, 2005, 2011).



Diversas investigaciones han evaluado la validez y fiabilidad del sistema inercial (IMU) de WIMU® para el análisis de acciones deportivas, mostrando resultados consistentes en variables como la carga locomotora, las aceleraciones y los saltos (Bastida-Castillo et al., 2018; Casamichana et al., 2018; Reina et al., 2019; Gómez-Carmona et al., 2019). Estos hallazgos respaldan su uso como herramienta robusta para la monitorización del rendimiento en deportes colectivos. Un aspecto favorable del dispositivo WIMU® es que integra tecnología de posicionamiento junto con sensores inerciales (IMU), lo que permite registrar simultáneamente variables espaciales y cinemáticas, así como estimar indicadores mecánicos asociados al movimiento (e.g., carga mecánica, impactos), facilitando la detección de acciones dinámicas como los cambios de dirección (COD). Esta combinación de sensores y su amplia utilización en entornos profesionales de fútbol lo convierte en un dispositivo pertinente para evaluar la cuantificación de COD en situaciones de juego real.

Sin embargo, a pesar de la validación de algunos movimientos (e.g., desplazamiento, aceleración, salto, rango articular), la detección de COD en la práctica real del fútbol aún no ha sido plenamente confirmada por la literatura. Varios estudios han analizado la precisión de distintos algoritmos aplicados en fútbol, demostrando una precisión aceptable para cuantificar e identificar el ángulo de giro durante COD mediante el uso de unidades de medición inercial (IMUs), cuando los participantes ejecutaban un recorrido en un circuito estándar, es decir, en un contexto controlado o cerrado (Alanen et al., 2021; Avilés et al., 2023a; Balloch et al., 2019). No obstante, la variabilidad e incertidumbre inherentes al movimiento en deportes como el fútbol parecen justificar la implementación de diferentes filtros de suavizado de ruido, con el fin de eliminar artefactos indeseados y registrar únicamente el movimiento relevante (Avilés et al., 2023a; Avilés et al., 2023b). De hecho, es en situaciones de juego real —contexto abierto— donde la literatura muestra mayor controversia respecto a la precisión de las IMUs. Si bien algunos trabajos han reportado una precisión moderada-alta para la detección de diversas acciones deportivas durante la competición (Benson et al., 2020; Charlton et al., 2017; Luteberget et al., 2018; Reardon et al., 2017; Reilly et al., 2021), numerosos estudios han utilizado algoritmos con una validación insuficiente o inconsistente antes de su aplicación en escenarios reales de juego (Casamichana et al., 2018; Pillitteri et al., 2023; Scanlan et al., 2019; Svilar et al., 2019; Szigeti et al., 2022).

Esto pone de manifiesto la necesidad de estudios específicos que contrasten su fiabilidad de este tipo de acciones en juego real, los cuales son determinantes para el rendimiento y la prevención de lesiones en el deporte. Debido a la amplia variabilidad reportada en el número de COD por jugador y a las diferencias metodológicas entre estudios, parece necesario validar los procedimientos de cálculo para detección y cuantificación de estas acciones. En este sentido, y a diferencia de estudios previos que han validado el sistema IMU para variables como la carga locomotora, aceleraciones o saltos, el presente estudio tiene como objetivo analizar el acuerdo entre la observación mediante video y un sistema inercial (IMU) para registrar los cambios de dirección en una tarea de fútbol. La hipótesis de partida es que el sistema IMU mostrará una concordancia óptima con la observación basada en vídeo en la detección de los COD, basándose en evidencias previas obtenidas en condiciones controladas (Avilés et al., 2023a). No obstante, dada la mayor variabilidad inherente a los contextos de juego real (e.g., tarea jugada), es posible que el grado de concordancia sea menor al de situaciones estandarizadas (e.g., desplazamiento programado). Esta aproximación permite explorar su desempeño en situaciones de juego real, contribuyendo a evaluar su potencial como herramienta fiable y práctica para la cuantificación automática de COD en entrenamiento y competición, sin asumir resultados previos en entornos abiertos.

Método

Participantes

Un total de 16 jugadores jóvenes de fútbol de élite (20.5 ± 2.1 años, 1.84 ± 0.02 m y 78.3 ± 3.9 kg) pertenecientes al equipo U21 de un club de La Liga, tomaron parte en el estudio. Todos los jugadores dieron el consentimiento para participar en el estudio. The Ethics Committee of research with humans (CEISH) of the University of the Basque Country (UPV/EHU) gave its institutional approval of the study (code M10-2024-124).

Procedimiento



Tarea de fútbol

Para llevar a cabo el estudio de la validez, se utilizó una tarea jugada 8vs8 (ocho jugadores por equipo), con dos comodines por fuera, en un espacio de juego 40 m ancho x 50 m largo (125 m²/jugador), asegurándose un espacio de juego efectivo, similar al del juego real. El objetivo de la tarea era marcar gol en una de las dos mini-porterías situadas en la línea de fondo del campo rival. El tiempo de la tarea fue de dos repeticiones de seis min con 1.5 min de pausa entre repeticiones. Los jugadores disponían de toque libre. Cuando el balón salía del espacio de juego, rápidamente unos de los integrantes del staff, introducía un nuevo balón, tratando de mantener un ritmo alto de juego. Todos los jugadores mantuvieron la misma posición durante el transcurso de la tarea. La superficie de juego fue césped artificial. El día de la grabación de la tarea, fue soleado, con una temperatura aproximada de 25º en el momento de la grabación.

COD a partir de los dispositivos WIMU®

Los jugadores utilizaron los dispositivos WIMU® (RealTrack Systems, Almería, Spain), a los que estaban habituados, porque formaba parte del proceso de monitorización diaria establecida en el club. Cada jugador vistió un peto ajustado al pecho, mediante el cual el jugador portaba en el espacio inter-escapular un dispositivo inercial. El peso del dispositivo es de 70 gr, con una dimensión de 81x45x16 mm. Este dispositivo está formado entre otros, por un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro tri-axiales ajustado a una frecuencia de 100 Hz, manteniendo así la homogeneidad con otras intervenciones (Alanen et al., 2021; Avilés et al., 2023; Balloch et al., 2019).

El algoritmo usado en la detección y el cálculo de los ángulos de giro está implementado directamente en el módulo "Change of Inertia" de sPRO®, aprovechando el sistema modular de plug-ins (Monitors) que ofrece el software sPRO®. Cada módulo, accede a los datos de los sensores/canales que genera cada dispositivo IMU. El algoritmo obtiene la información de los canales de datos Euler X (grados de orientación del sujeto respecto al norte) y Earth X, Y (componentes de la aceleración en el plano horizontal respecto a la tierra), mediante el uso de los magnetómetros. De esta forma, se usan los valores Earth X y Earth Y para calcular la aceleración medio-lateral y antero-posterior. Estas aceleraciones, están relacionadas con cambios de inercia (COI) que experimenta el jugador. Para hacer el cambio de sistema de coordenadas del vector horizontal (del sistema de la tierra al sistema local del sujeto), se re-proyectan los datos de Earth X, Earth Y usando el dato del canal Euler X, que se ha calculado en el paso anterior, y se calcula el ángulo y módulo que forman los vectores nuevos. Una vez detectado cada COI, se aplica un algoritmo de unificación basado en autómatas, para identificar varios movimientos de tipo COI, en una sola acción de tipo COD. De esta forma, y teniendo en cuenta el tamaño del módulo, se calcula la duración del COD (ms). Por último, se analiza la orientación del sujeto antes y después del movimiento para estimar el ángulo de giro en la trayectoria de entrada y salida del COD.

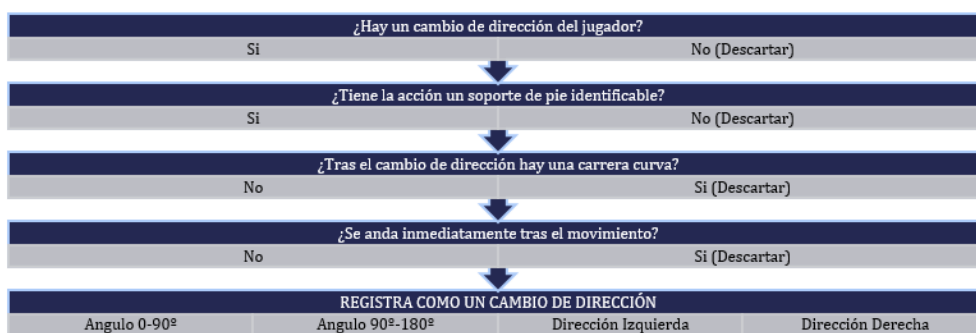
Después de la realización de las tareas jugadas, se extrajeron los datos registrados de ambas herramientas de medición para su posterior análisis. Los registros detectados por IMU fueron descargados en la aplicación sPRO® de los dispositivos. En ausencia de un consenso claro en la literatura sobre los parámetros óptimos de filtrado aplicables a este tipo de señales, se evaluaron diferentes configuraciones de filtros post-hoc con el objetivo de analizar el efecto del procesamiento sobre las mediciones obtenidas. Este algoritmo autómatas permite modificar la duración mínima del módulo duración para la detección del COD, el pico mínimo de intensidad (G) que debe alcanzar el COD para ser registrado, así como el porcentaje de suavizado de la señal inercial (%S), con el objetivo de reducir la influencia de artefactos en la señal, a través del software propio del dispositivo sPRO®. Con el propósito de evaluar la sensibilidad del sistema a distintos parámetros de procesamiento, se generaron las siguientes combinaciones en función del porcentaje de suavizado aplicado (%S) y el pico mínimo de intensidad (G): %S40-1G; %S40-0.9G; %S40-0.8G; %S30-1G; %S30-0.9G y %S30-0.8G. Para el tiempo mínimo del COD se estableció de manera predeterminada 400 ms, de acuerdo con valores previamente reportados para angulaciones bajas (Avilés et al., 2023). El análisis de las diferentes combinaciones de filtrado debe interpretarse como un procedimiento de carácter exploratorio, orientado a evaluar la sensibilidad del sistema a distintos parámetros de procesamiento, y no como un proceso de optimización confirmatoria ni de selección de una configuración definitiva. En relación con la velocidad pre COD, se establecieron cuatro umbrales de velocidad/intensidad: 0-12 km/h (baja), 12-18 km/h (media), 18-24 km/h (alta) y >24 km/h, con el propósito de clasificar los COD según la velocidad de entrada al evento registrado.



COD a partir de la observación

El análisis completo del vídeo fue llevado a cabo por el mismo observador, el cual tenía 8 años de experiencia en el manejo de la tecnología y enseñanza de habilidades del movimiento en jugadores jóvenes de fútbol. El analista responsable del análisis de vídeo realizó el proceso de forma cegada respecto a los resultados del sistema IMU, con el objetivo de evitar posibles sesgos en la identificación y codificación de los eventos, que comprometiera el proceso de calidad del dato. Para la detección del COD, y con el propósito de unificar criterios con la literatura ya publicada, se usó un árbol decisional, basado en el trabajo previo de Morgan et al. (2022) (Figura 1). El COD fue entendido, como un cambio de trayectoria causado por un empuje plantar de una pierna, haciendo cambiar la trayectoria previa a la que el jugador recorría. Los cambios de dirección fueron identificados en situaciones de juego reales (e.g., tarea jugada), centrándose en el registro de las características del COD, incluyendo acciones tanto con balón como sin balón y en ambas fases del juego, posesión y no posesión del balón del equipo. Los cambios de dirección fueron visualmente analizados por el observador, tomando como referencia el plano sagital del jugador en el momento de empuje del suelo, y la orientación de salida del tronco tras el COD. Se codificaron cuatro posibles angulaciones: COD 0°-90° izquierda, COD 0°-90° derecha, COD 90°-180° izquierda y COD 90°-180° derecha (ver figura 1). La grabación de vídeo fue analizada usando el software de análisis deportivo LongoMatch versión 1.12.1.47, en el cual se creó una botonera con las cuatro posibles direcciones, con el propósito de registrar los eventos detectables. Posteriormente, se calculó dos nuevas direcciones, agrupando todos los COD a la derecha (COD derecha) y todos hacia izquierda (COD izquierda). La velocidad de la reproducción del vídeo durante la observación fue de 1x, utilizando velocidades más bajas, como 0.25x, para aumentar la precisión del análisis en algunas acciones. Una vez finalizada la observación se descargó el archivo de excel, con las acciones etiquetadas de cada jugador. La tarea fue grabada mediante un dron (DJI Mavic Pro, DJI, Shenzhen, China), con grabación de vídeo a 4K, pilotado por uno de los analistas del staff, con alta experiencia diaria en el uso de este tipo de herramientas. El dron fue situado aproximadamente y de manera fija en un fondo del recuadro marcado en el campo, a una altura de unos 20 m. La grabación de vídeo fue analizada usando el software de análisis deportivo LongoMatch versión 1.12.1.47. Una vez descargados los archivos en formato Excel, provenientes tanto del software de análisis de video como del software de IMU, se procedió al análisis estadístico correspondiente para el proceso de validación. Este procedimiento ha sido empleado previamente cuando el objetivo es comparar eventos deportivos claramente detectables, y ha sido llevado a cabo por analistas expertos en la materia (MacDonald et al., 2017; Reardon et al., 2017).

Figura 1. Flujo decisional usado para el registro de COD durante el análisis de video.



Análisis de datos

Para evaluar la concordancia en la codificación de los datos, se llevó a cabo un análisis de fiabilidad inter-observador mediante el coeficiente Kappa de Cohen. Dos evaluadores con más de ocho años de experiencia en la implementación de tecnología GPS en la práctica deportiva, así como en análisis de vídeo, analizaron de forma simultánea a dos jugadores seleccionados de manera aleatoria durante el total de la tarea, resultando en un total de 24 min de observación de vídeo, representando una submuestra del material registrado. En estudios basados en metodología observacional y análisis del rendi-

miento deportivo, se recomienda estimar la concordancia entre observadores a partir de una proporción representativa del total de los datos, siendo habitual emplear aproximadamente entre un 10% y un 20% de las observaciones para verificar la fiabilidad de los observadores (Anguera et al., 2011; O'Donoghue, 2010). En el presente estudio, la fiabilidad se calculó a partir de 24 min correspondientes a dos jugadores ($\approx 10\%$ de la muestra total).

Con el propósito de unificar criterios para la codificación de los COD, se siguió el árbol decisional descrito anteriormente. Una vez verificada la concordancia entre ambos evaluadores, uno de ellos repitió el proceso de codificación de manera independiente tras un intervalo temporal de una semana, con el objetivo de determinar la fiabilidad intra-observador. Los valores de Kappa obtenidos fueron interpretados de acuerdo con los criterios establecidos en la literatura (McHugh, 2012). El proceso de análisis fue llevado a cabo mediante Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA) y el software ComKappa para Windows 95. Los niveles de concordancia fueron establecidos como: casi perfecta (>0.9), fuerte (>0.8), moderada (0.8–0.6), débil (0.6–0.4), mínima (0.4–0.2) y ninguna (0.2–0.0). Se realizó un análisis descriptivo de promedio y desviación estándar, de los COD registrados en cada uno de los umbrales de velocidad pre COD, duración del COI y pico intensidad del COI. Posteriormente, se realizó un análisis descriptivo del total, promedio y desviación estándar, de los registros obtenidos por el video y el dispositivo inercial para cada una de las direcciones. El nivel de concordancia fue evaluado mediante el método Bland-Altman, con un límite de acuerdo del 95%. El nivel de nivel de correlación entre ambas herramientas de medición fue evaluado mediante la correlación de Pearson de acuerdo con las recomendaciones de Cohen (1988) de la siguiente manera: $r = 0.10-0.29$ (pequeño); $r = 0.30-0.49$ (mediano); $r = 0.50-1.0$ (grande). Para el análisis de la validez entre los eventos registrados a través del video y los registrados por IMU, se empleó el coeficiente de correlación intraclase (CCI) intervalos de confianza del 95%. La interpretación de los valores del CCI se realizó de acuerdo con los criterios de Munro et al. (1986), clasificándose como moderada (0.50–0.69), alta (0.70–0.89) o excelente (≥ 0.90). Dado que el objetivo del presente estudio fue evaluar la concordancia entre dos métodos de medida aplicados a las mismas observaciones, no se realizó un cálculo de tamaño muestral basado en potencia estadística. En estudios de comparación de métodos, el interés principal se centra en estimar el grado de acuerdo entre instrumentos mediante métricas anteriormente descritas como el coeficiente de correlación intraclase (CCI) y el análisis de Bland-Altman, más que en contrastar hipótesis o detectar diferencias entre grupos. Por tanto, la interpretación de los resultados se basa en la magnitud del acuerdo y en la identificación de posibles sesgos sistemáticos, siguiendo las recomendaciones metodológicas descritas en la literatura (Bland & Altman, 1986, 1999). El nivel de significación estadística se estableció en $p < 0.05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron con Jamovi software (V1.6.7.0, Sydney, Australia; The Jamovi project, 2021).

Resultados

Duración de COD, Pico de Intensidad, Pre Velocidad y Post Velocidad durante una tarea de fútbol usando IMU

En la Tabla 1 se describen las características de los COD registrados por el sistema inercial IMU. El 65% del total de COD registrados fueron precedidos de una velocidad baja (Pre Velocidad = 7.17 km/h), el 25% de una velocidad media (Pre Velocidad = 14.7 km/h), el 8% de velocidad media alta (Pre Velocidad = 20.9 km/h) y el 2 % de una velocidad alta (Pre Velocidad = 26.1 km/h). El tiempo de duración del COD hacia el lado izquierdo (Duración COD = 735.5 ms) fue mayor que hacia el derecho (Duración COD = 665.5 ms). El pico de intensidad COD registrado fue mayor en los COD de $0^\circ-90^\circ$ (pico intensidad COD = 1.2 G), que en las angulaciones de $90^\circ-180^\circ$ (pico Intensidad COD = 1.24 G).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos (media \pm desviación estándar) de la duración, pico de intensidad (G), velocidad previa y velocidad posterior según el tipo de cambio de dirección (COD) registrado durante la tarea de fútbol.

Tipo COD	Intervalo velocidad (km/h)	n	Duración (ms)	Pico de Intensidad (G)	Pre Velocidad (km/h)	Post Velocidad (km/h)
$0^\circ-90^\circ$	0-12	28	721.4 \pm 276.7	1.19 \pm 0.14	6.3 \pm 2.8	11.7 \pm 6.1
Izquierda	12-18	8	745.0 \pm 400.1	1.23 \pm 0.12	14.4 \pm 1.6	14.4 \pm 3.7
	18-24	1	1070.0	1.10	22.4	8.4
	24-50	0	-	-	-	-



	Media	-	735.9 ±303.3	1.19 ±0.13	8.5 ±4.8	12.2 ±5.7
0°-90° Derecha	0-12	38	652.1 ±264.8	1.22 ±0.14	7.28 ±3.0	10.5 ±5.9
	12-18	5	692.0 ±253.9	1.17 ±0.13	14.9 ±2.4	10.5 ±6.8
	18-24	2	550.0 ±98.9	1.35 ±0.16	19.2 ±0.3	10.4 ±6.4
	24-50	0	-	-	-	-
	Media	-	652.0 ±256.4	1.2 ±0.14	8.6 ±4.4	10.5 ±5.9
90°-180° Izquierda	0-12	29	805.8 ±431.6	1.29 ±0.20	7.8 ±2.5	10.5 ±4.8
	12-18	18	662.2 ±212.8	1.19 ±0.16	14.9 ±1.6	10.4 ±4.3
	18-24	6	625.0 ±139.8	1.21 ±0.20	21.2 ±2.4	8.0 ±7.2
	24-50	0	-	-	-	-
	Media	-	736.6 ±350.7	1.25 ±0.19	11.7 ±5.2	10.2 ±4.9
90°-180° Derecha	0-12	35	650.0 ±165.6	1.21 ±0.16	7.3 ±2.9	9.1 ±4.0
	12-18	19	741.0 ±387.8	1.27 ±0.24	14.6 ±1.6	10.1 ±5.4
	18-24	7	678.5 ±328.0	1.22 ±0.24	20.8 ±1.6	10.0 ±4.5
	24-50	1	560.0	1.22	26.1	1.5
	Media	-	679.6 ±268.6	1.23 ±0.20	11.4 ±5.7	9.5 ±4.5

Concordancia intra- e inter- observador usando Video

Los valores de la Kappa de Cohen se recogen en la Tabla 2. El nivel de concordancia inter observador (Observador 1 vs 2) fue moderada ($k = 0.70$), mientras que la concordancia intra observador (Observador 1A vs 1B) fue fuerte ($k = 0.81$).

Tabla 2. Coeficiente kappa de Cohen y grado de concordancia intra-observador entre las diferentes combinaciones de filtrado del sistema IMU.

	Observación 1B	%S40-1G	%S40-0.9G	%S40-0.8G	%S30-1G	%S30-0.9G	%30-0.8G
Observación 1A	0.81 Fuerte	0.60 Moderada	0.55 Débil	0.34 Mínima	0.35 Mínima	0.25 Mínima	0.18 Ninguna
Observación 1B	-	0.57 Débil	0.53 Débil	0.32 Mínima	0.33 Mínima	0.34 Mínima	0.17 Ninguna

Acuerdo entre sistemas: Vídeo vs IMU

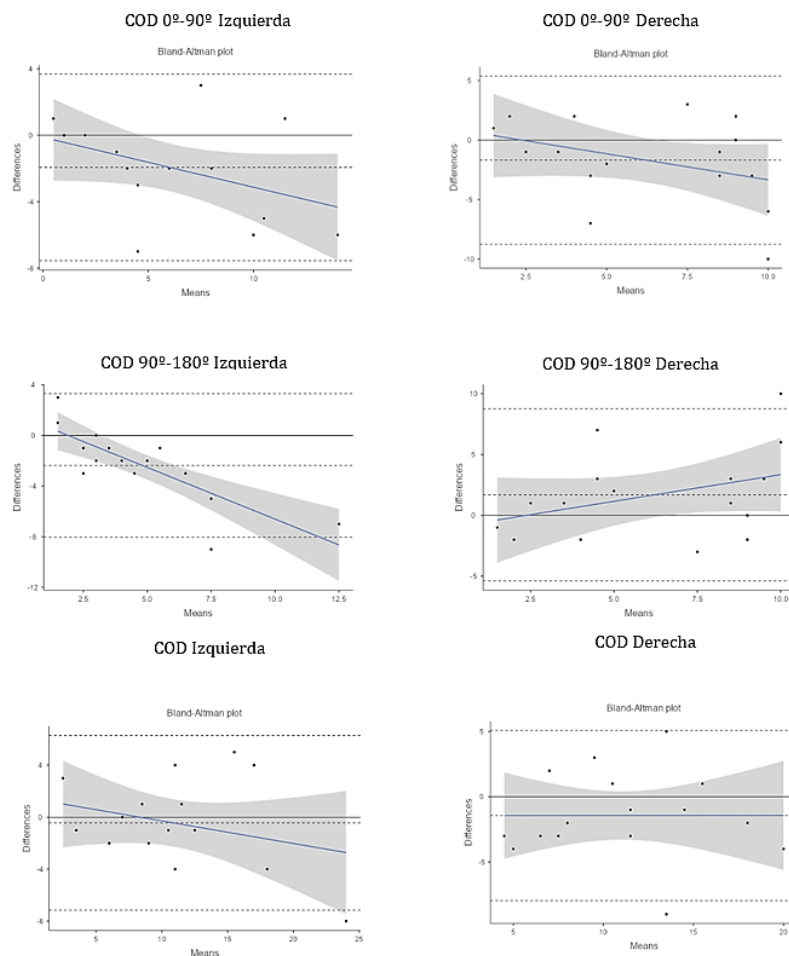
La comparativa entre sistemas están recogidos en la Tabla 3. La combinación de filtrado %S40-1G, mostró el mayor nivel de concordancia en relación con Observación 1A ($k = 0.601$), disminuyendo a mínima o ninguna, cuando el porcentaje de suavizado descendió al 30 % y pico mínimo de intensidad 0.9 G. Tomando %S40-1G como combinación de filtrado, se observaron diferencias moderadas a grandes entre los métodos de registro (Vídeo vs. IMU) para los COD de 0°-90° tanto a la izquierda como a la derecha ($d = 1.93$ y 1.68 , respectivamente), así como para los COD entre 90°-180° ($d = -2.3$ y -3.1), siendo todas estas diferencias estadísticamente significativas. Los COD totales hacia izquierda y derecha mostraron diferencias pequeñas ($d = -0.42$ y -1.43). La correlación de Pearson evidenció relaciones moderadas a altas entre ambos métodos ($r = 0.51-0.84$), y los valores del CCI mostraron una fiabilidad baja-moderada a alta en la mayoría de las direcciones ($ICC = 0.61-0.85$), con especial consistencia en los COD totales izquierda y derecha, aunque se observaron discrepancias mayores en los cambios de dirección más agudos (90°-180°).

Tabla 3. Estadística descriptiva y análisis de validez basados en coeficientes de correlación intraclase (CCI) y r de Pearson para el análisis de validez.

Direcciones	Vídeo (Media ±DE)	IMU (Media ±DE)	d (95% IC)	Pearson r	CCI (95% CI)
COD 0°-90° Izquierda	7.0 ±4.8	5.0 ±3.7	1.93 (0.4/3.4)*	0.811	0.72 (0.28/0.89)
COD 0°-90° Derecha	7.1 ±4.0	5.3 ±2.9	1.7 (-0.2/3.6)*	0.511	0.61 (-0.01/0.86)
COD 90°-180° Izquierda	3.6 ±1.8	6.0 ±4.0	-2.3 (-3.9/-0.8)*	0.773	0.47 (-0.02/0.77)
COD 90°-180° Derecha	3.3 ±2.4	6.4 ±3.1	-3.1 (-4.2/-2.0)*	0.753	0.62 (-0.30/0.89)
COD Izquierda	10.6 ±5.4	11.1 ±6.3	-0.42 (-2.2/1.3)	0.843	0.83 (0.60/0.94)
COD Derecha	10.3 ±4.8	11.7 ±4.8	-1.43 (-3.2/0.3)	0.766	0.85 (0.58/0.94)

Nota: Media ± DE = media y desviación estándar de los COD registrados por todos los jugadores a cada dirección; d = diferencia de media entre el analista de vídeo y la unidad de micro tecnología junto intervalo de confianza del 95 %; r = valor del coeficiente de correlación de Pearson para los COD registrados por el analista de vídeo e IMU. CCI = coeficiente de correlación intraclase.

Figura 2. Límites de concordancia de Bland-Altman para las diferentes direcciones; Línea discontinua central = valor medio; líneas discontinuas inferior y superior = límites de concordancia del 95 %. Diferencia = (media de COD registrados por el analista de vídeo experto) – (media de COD registrados por unidad de micro tecnología). Media = [(media de COD registrados por el analista de vídeo experto) + (media de COD registrados por IMU)]/2. Zona sombreada: intervalo de confianza alrededor de la línea de regresión de las diferencias.



Discusión

El objetivo del presente estudio fue analizar el acuerdo entre IMU y la observación de vídeo para registrar cambios de dirección (COD) en una tarea de fútbol. Los resultados del presente estudio indican que el sistema IMU no demuestra un nivel de concordancia suficiente con el método de referencia como para ser considerado intercambiable en condiciones de juego real.

En términos generales, los coeficientes de Pearson mostraron correlaciones moderadas-altas entre ambos métodos ($r = 0.51-0.84$). Sin embargo, tal como señalan Atkinson & Nevill (1998), la correlación únicamente refleja el grado de correlación lineal entre variables y no implica necesariamente acuerdo entre métodos de medida. Dos métodos pueden estar altamente correlacionados si siguen un patrón similar de variación entre sujetos, aun cuando presenten diferencias sistemáticas en los valores registrados. Por esta razón, los análisis de correlación se complementaron con el coeficiente de correlación intraclase (CCI) y, especialmente, con el análisis de Bland-Altman, que permiten evaluar de forma más apropiada el nivel de concordancia entre ambos sistemas. Los valores de ICC obtenidos mostraron una variabilidad considerable entre las diferentes categorías analizadas (0.47–0.85), lo que indica que el grado de concordancia entre métodos no es uniforme y puede depender de las características específicas del COD. Mientras que algunos eventos mostraron niveles de acuerdo moderados a buenos, otros presentaron valores de concordancia más bajos, lo que refuerza la idea de que ambos métodos no deben considerarse completamente intercambiables y que la precisión del sistema IMU puede variar según el

tipo de acción evaluada. Específicamente, se observaron valores aceptables cuando los cambios de dirección se agruparon según el sentido del movimiento (izquierda vs. derecha) ($ICC = 0.83-0.85$), lo que sugiere que el dispositivo puede ser útil para analizar tendencias generales de movimiento o evaluar comportamientos a nivel agregado. No obstante, la reducción de los valores en el resto de angulaciones ($ICC = 0.47-0.72$) indica que el nivel de acuerdo entre métodos disminuye cuando el COD implica rotaciones más amplias o cambios de trayectoria más bruscos. La menor concordancia observada en los cambios de dirección de mayor angulación ($90^{\circ}-180^{\circ}$) puede explicarse, en parte, por las características del algoritmo de detección del sistema IMU. La estimación del ángulo de giro se basa en la orientación del sujeto (Euler X) y en la reproyección de las aceleraciones horizontales (Earth X-Y), procesos en los que pequeños errores derivados de la fusión sensorial o del filtrado pueden amplificarse al calcular la diferencia angular. Este efecto es especialmente relevante en acciones con alta rotación y cambios bruscos de dirección, donde la precisión en la estimación de la orientación resulta más crítica. Asimismo, la unificación de los eventos de cambio de inercia puede introducir incertidumbre en la delimitación del COD, contribuyendo a la menor concordancia observada en estas acciones. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han señalado limitaciones de los sensores inerciales para detectar gestos caracterizados por aceleraciones rotacionales elevadas o cambios abruptos de velocidad (Balloch et al., 2019; Meylan et al., 2017; Reardon et al., 2017).

El análisis de Bland-Altman permitió profundizar en la naturaleza del desacuerdo entre el sistema IMU y la observación de vídeo. Además de los sesgos sistemáticos observados, los resultados evidenciaron la presencia de sesgo proporcional, lo que indica que la magnitud del error entre métodos no es constante, sino que tiende a incrementarse conforme aumenta la angulación del cambio de dirección. Este hallazgo sugiere que la precisión del sistema IMU depende del rango de medición, mostrando un comportamiento más estable en acciones de menor angulación y un deterioro progresivo en aquellas que implican mayores rotaciones o cambios bruscos de trayectoria (e.g., mayor angulación en el COD). Asimismo, los amplios límites de acuerdo observados reflejan una elevada variabilidad entre ambos métodos, lo que implica que las diferencias individuales pueden ser sustanciales incluso cuando los valores medios son similares. Desde una perspectiva aplicada, estos resultados indican que el sistema IMU no puede considerarse intercambiable con el método de referencia en condiciones de juego real, especialmente cuando se pretende analizar con precisión la angulación del gesto. La observación de mayores niveles de concordancia al agrupar los cambios de dirección según lateralidad (izquierda/derecha) debe interpretarse con cautela. Este resultado deriva de un análisis post-hoc y no formaba parte de los objetivos iniciales del estudio, por lo que no puede considerarse un enfoque metodológico robusto ni una alternativa válida para la cuantificación del gesto. Más bien, sugiere que simplificar la variable analizada (agrupando angulaciones) puede influir en el grado de acuerdo observado, lo que pone de manifiesto las limitaciones actuales del sistema para estimar con precisión la angulación del movimiento. Aunque los resultados no respaldan la hipótesis inicial, aportan evidencia relevante sobre las limitaciones de los sistemas IMU en la detección del COD en contextos de juego real, contribuyendo a una mejor comprensión de los factores que condicionan su precisión. La variabilidad y el aumento del error en situaciones de juego real, donde los COD presentan mayor imprevisibilidad y variaciones de velocidad, refuerzan la necesidad de optimizar los filtros de detección y ajustar dinámicamente los umbrales de intensidad y duración tal como sugieren investigaciones previas (Avilés et al., 2023; Reardon et al., 2017). La falta de concordancia observada en condiciones de filtrado no óptimas (30 % de reducción de ruido y 0.8 G) demuestra que pequeñas variaciones en la configuración del algoritmo pueden generar falsos positivos o pérdidas de eventos relevantes. Estos datos, concuerdan con los resultados anteriormente publicados, donde se comprobó cómo aumentando el umbral de intensidad mínima (G) para el registro de la acción, aumentaba la precisión del registro total (Avilés et al., 2023; Reardon et al., 2017; Meylan et al., 2017). A través de estos datos, sería recomendable para futuras investigaciones, analizar en primer lugar, en un contexto cerrado, en que umbrales de intensidad (G) y duración (ms) se comporta el movimiento específico, para posteriormente ajustar de manera más precisa, los filtros incorporados en los algoritmos y que esto pudiera hacerse de manera dinámica.

La ventaja de disponer de sensores para el registro automático de los movimientos y desplazamientos de los jugadores (Chambers et al., 2015), es una clara ventaja a la ardua tarea de monitorizar las demandas de los entrenamientos y partidos mediante metodología observacional (Bloomfield et al., 2007; Morgan et al., 2022). La micro tecnología aparentemente permite a los preparadores disponer de una

información detalla de lo realizado por los jugadores. Así, por ejemplo, en el presente estudio, los sistemas inerciales capturados a partir de los dispositivos IMU han permitido describir la duración, el *peak*, así como las velocidades de entrada y salida del COD. La duración media registrada entre todos los COD fue de 700 ms, datos ligeramente inferiores a los publicados por Granero-Gil et al., (2020) en jugadores de fútbol profesional durante competición, los cuales registraron valores superiores a 800 ms, así como los publicados por Kai et al., (2021), en jugadores amateurs, con tiempo medio de 900 ms. De esta forma, el umbral de duración mínima de duración de 400 ms establecido para este trabajo podría haber sido superior, asegurando un filtro más robusto con el propósito de eliminar acciones no deseadas. Atendiendo a las velocidades pre-COD, la mayoría de los eventos registrados durante la tarea, fueron ejecutados a velocidades pre COD bajas entre 0–12 km/h. Esto podría ser debido a dos razones. La primera, el espacio que cada jugador ocupó en la tarea de manera relativa (125 m²/jugador), en función del espacio total de la tarea (2000 m²), fue medio, atendiendo a la clasificación de Castellano & Casamichana (2016), lo que enfatizó los desplazamientos multidireccionales más que carreras a altas velocidades. En segundo lugar, acorde a datos publicados anteriormente por Deutsch et al (2024), el 93 % de los COD realizados a lo largo de 308 partidos en la Bundesliga, fueron realizados a velocidad pre COD de menos de 19 km/h, estando solo un 7 % por encima de 25 km/h. Por último, a diferencia de la duración, la intensidad de los COD, aumentaron conforme la angulación fue siendo mayor, relación previamente estudiada en la literatura y con influencia directa en la carga en la articulación rodilla (Dos'Santos et al., 2018). Estos datos describen por primera vez en la literatura, variables cinéticas del COD durante el juego real. Este estudio no analizó, la precisión de la micro tecnología para detectar COD y angulaciones a velocidades altas y/o de juego en dimensiones reales, pudiendo ser objeto de estudio, para investigaciones futuras.

Por último, es necesario considerar algunas limitaciones metodológicas de este estudio. En primer lugar, ambos sistemas de cuantificación de los cambios de dirección (COD) presentaron cierto grado de error, tanto entre observadores como en el sistema IMU, lo que podría haber contribuido a la falta de consenso en la identificación de los COD. En este sentido, el método de referencia basado en observación de vídeo mostró una concordancia inter-observador moderada ($k = 0.70$), lo que implica la presencia de cierto grado de error en la identificación de los eventos. No obstante, este nivel de acuerdo se sitúa dentro de los rangos habitualmente reportados en estudios de análisis del rendimiento deportivo basados en metodología observacional, donde se han descrito valores de fiabilidad entre aproximadamente 0.60 y 0.85 en función del tipo de evento y del contexto de análisis (Rampinini et al., 2007; Sarmiento et al., 2010). Este nivel de concordancia refleja la variabilidad inherente a la observación de acciones complejas en contextos abiertos de juego, si bien debe considerarse que el error asociado al método de referencia puede haber influido en los análisis de concordancia realizados con el sistema IMU, afectando a la estimación del acuerdo entre ambos métodos. En segundo lugar, durante una actividad compleja como una tarea jugada, algunos movimientos no directamente relacionados con los COD (p. ej., disputas, duelos, impactos o golpes) podrían cumplir los criterios de intensidad mínima y orientación corporal establecidos para la detección automática mediante IMU, lo que podría generar registros que se alejan de la definición operativa de COD. En tercer lugar, la evaluación de múltiples combinaciones de filtrado mediante un enfoque post-hoc puede haber introducido un sesgo de selección, al identificarse la configuración que mostró un mayor nivel de concordancia dentro de la misma muestra analizada. Este procedimiento, aunque útil para explorar la sensibilidad del sistema a distintos parámetros de procesamiento en ausencia de un consenso previo, limita la capacidad de generalización de los resultados y puede sobreestimar el grado de acuerdo observado. En este sentido, futuros estudios deberían validar estas configuraciones en muestras independientes, con el fin de confirmar la estabilidad de los resultados obtenidos. Por último, una limitación adicional relevante está relacionada con el software utilizado para el procesamiento de los datos del sistema IMU. La falta de acceso a los detalles del algoritmo impide conocer con precisión aspectos críticos como los métodos de fusión sensorial empleados para estimar la orientación del sujeto, los umbrales exactos utilizados en la detección de eventos, los criterios de segmentación temporal para la identificación de los cambios de dirección, así como los parámetros de filtrado aplicados a la señal. Esta opacidad dificulta la identificación del origen de los errores observados, como los sesgos sistemáticos y proporcionales detectados en el análisis de Bland–Altman, y limita la posibilidad de ajustar u optimizar el algoritmo en función de las características específicas del movimiento analizado. Asimismo, restringe la reproducibilidad del estudio y la comparabilidad de los resul-

tados con otros trabajos que utilicen sistemas, dispositivos o configuraciones diferentes. A pesar de estas limitaciones, los resultados evidencian oportunidades para avanzar en la detección de este tipo de acciones, relevantes en la práctica deportiva y que suelen no registrarse sistemáticamente en la gestión de cargas en el proceso de entrenamiento. Esto subraya la necesidad de futuros desarrollos que mejoren la sensibilidad y especificidad de estos sistemas para registrar con mayor precisión este tipo de movimientos.

Conclusiones

En conclusión, los resultados indican que ambos sistemas IMU y video presentan limitaciones en su concordancia para la detección de cambios de dirección, por lo que ambos métodos no deben considerarse intercambiables. Aunque se observaron niveles aceptables de concordancia cuando los COD se agruparon según la lateralidad (izquierda/derecha), este resultado debe interpretarse con cautela, y puede ser reflejo de la complejidad del movimiento analizado, el COD. En consecuencia, se sigue sin la precisión necesaria para hacer evaluaciones individuales ni para el análisis detallado del gesto en condiciones abiertas representativas del juego. Estos resultados evidencian la necesidad de optimizar los algoritmos de detección y los procedimientos de procesamiento de señal, incluyendo el afinamiento de los umbrales de filtrado y el desarrollo de métodos de calibración más robustos. Asimismo, la observación debe seguir estando presente en futuras investigaciones para evaluar la validez de la información registrada por los dispositivos, tratando en la medida de lo posible aplicarlo en contextos competitivos complejos (no linealidad, multiaxial y alta variabilidad motriz) característico de un deporte como es el fútbol.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Proyecto del Gobierno español titulado Optimización del proceso de preparación y rendimiento competitivo en Deportes de Equipo, basado en la integración de datos multimodales y multinivel mediante modelos inteligentes [PID2023-147577NB-I00] para el cuatrienio 2024-2027, en la convocatoria 2023 de ayudas para «PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO», en el marco del Programa Estatal de Impulso a la Investigación Científica-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU).

Referencias

- Alanen, A. M., Räisänen, A. M., Benson, L. C., & Pasanen, K. (2021). The use of inertial measurement units for analyzing change of direction movement in sports: A scoping review. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 16(6), 1332–1353. <https://doi.org/10.1177/17479541211003064>
- Anguera Argilaga, M. T., Blanco Villaseñor, Ángel, Hernández Mendo, A., & Losada López, J. L. (2011). Diseños Observacionales: Ajuste y aplicación en psicología del deporte. *Cuadernos De Psicología Del Deporte*, 11(2), 63–76.
- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26(4), 217–238. <https://doi.org/10.2165/00007256-199826040-00002>
- Avilés, R., Brito de Souza, D., Pino-Ortega, J., & Castellano, J. (2023a). Agreement, accuracy, and reliability of a new algorithm for the detection of change of direction angle based on integrating inertial data from inertial sensors. *Algorithms*, 16(11), 496. <https://doi.org/10.3390/a16110496>
- Avilés, R., Souza, D. B., Pino-Ortega, J., & Castellano, J. (2023b). Assessment of a new change-of-direction detection algorithm based on inertial data. *Sensors*, 23(6), 3095. <https://doi.org/10.3390/s23063095>
- Balloch, A., Meghji, M., Newton, R. U., & Hart, N. (2020). Assessment of a novel algorithm to determine change-of-direction angles while running using inertial sensors. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(12), 3375–3385. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003064>

- Batterham, A. M., & Hopkins, W. G. (2006). Making meaningful inferences about magnitudes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(1), 50–57. <https://doi.org/10.1123/ijsp.1.1.50>
- Benson, L. C., Tait, T. J., Befus, K., Choi, J., Hillson, C., Stilling, C., Grewal, S., MacDonald, K., Pasanen, K., & Emery, C. A. (2020). Validation of a commercially available inertial measurement unit for recording jump load in youth basketball players. *Journal of Sports Sciences*, 38(8), 928–936. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1737360>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307–310.
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research*, 8(2), 135–160. <https://doi.org/10.1177/096228029900800204>
- Bloomfield, J., Polman, R., & O'Donoghue, P. (2007). Physical demands of different positions in FA Premier League soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6(1), 63–70.
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., & Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors*, 18(3), 873. <https://doi.org/10.3390/s18030873>
- Casamichana, D., Bradley, P. S., & Castellano, J. (2018). Influence of the varied pitch shape on soccer players' physiological responses and time–motion characteristics during small-sided games. *Journal of Human Kinetics*, 64(1), 171–180. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0192>
- Chambers, R., Gabbett, T. J., Cole, M. H., & Beard, A. (2015). The use of wearable microsensors to quantify sport-specific movements. *Sports Medicine*, 45(7), 1065–1081. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0332-9>
- Chaouachi, A., Manzi, V., Chaalali, A., Wong, D. P., Chamari, K., & Castagna, C. (2012). Determinants analysis of change-of-direction ability in elite soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(10), 2667–2676. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318242f97a>
- Charlton, P. C., Kenneally-Dabrowski, C., Sheppard, J., & Spratford, W. (2017). A simple method for quantifying jump loads in volleyball athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(3), 241–245. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2016.07.007>
- Deutsch, J. P., Donath, L., Braunstein, B., & Rein, R. (2024). Frequency and intensity of changes of direction in German Bundesliga soccer. *Science and Medicine in Football*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/24733938.2024.2439859>
- Dos'Santos, T., Cowling, I., Challoner, M., Barry, T., & Caldbeck, P. (2022). What are the significant turning demands of match play of an English Premier League soccer team? *Journal of Sports Sciences*, 40(15), 1750–1759. <https://doi.org/10.1080/02640414.2022.2109355>
- Dos'Santos, T., Thomas, C., Comfort, P., & Jones, P. A. (2018). The effect of angle and velocity on change of direction biomechanics: An angle–velocity trade-off. *Sports Medicine*, 48(10), 2235–2253. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0968-3>
- Granero-Gil, P., Bastida-Castillo, A., Rojas-Valverde, D., Gómez-Carmona, C. D., De la Cruz Sánchez, E., & Pino-Ortega, J. (2020). Influence of contextual variables in the changes of direction and centripetal force generated during an elite-level soccer team season. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 967. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030967>
- Kai, T., Hirai, S., Anbe, Y., & Takai, Y. (2021). A new approach to quantify angles and time of changes of direction during soccer matches. *PLOS ONE*, 16(5), e0251292. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251292>
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- Little, T., & Williams, A. G. (2005). Specificity of acceleration, maximum speed, and agility in professional soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(1), 76–78. <https://doi.org/10.1519/14253.1>
- Luinge, H. J., & Veltink, P. H. (2005). Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 43(2), 273–282. <https://doi.org/10.1007/BF02345966>
- Luteberget, L. S., Holme, B. R., & Spencer, M. (2018). Reliability of wearable inertial measurement units to measure physical activity in team handball. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(4), 467–473. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0036>



- Martínez-Hernández, D., Quinn, M., & Jones, P. (2023). Linear advancing actions followed by deceleration and turn are the most common movements preceding goals in male professional soccer. *Science and Medicine in Football*, 7(1), 25–33. <https://doi.org/10.1080/24733938.2022.2030064>
- MacDonald, K., Bahr, R., Baltich, J., Whittaker, J. L., & Meeuwisse, W. H. (2017). Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height. *Physical Therapy in Sport*, 25, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2016.12.001>
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: The kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276–282.
- Meylan, C., Trewin, J., & McKean, K. (2017). Quantifying explosive actions in international women's soccer. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(3), 310–315. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0520>
- Morgan, O. J., Drust, B., Ade, J. D., & Robinson, M. A. (2022). Change of direction frequency off the ball: New perspectives in elite youth soccer. *Science and Medicine in Football*, 6(4), 473–482. <https://doi.org/10.1080/24733938.2021.1986635>
- O'Donoghue, P. (2010). *Research methods for sports performance analysis*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203878309>
- Pillitteri, G., Giustino, V., Petrucci, M., Rossi, A., Leale, I., Bellafiore, M., Thomas, E., Iovane, A., Palma, A., & Battaglia, G. (2023). Match-load physical demands in U-19 professional soccer players assessed by a wearable inertial sensor. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 8(1), 22. <https://doi.org/10.3390/jfmk8010022>
- Rampinini, E., Coutts, A. J., Castagna, C., Sassi, R., & Impellizzeri, F. M. (2007). Variation in top level soccer match performance. *International Journal of Sports Medicine*, 28(12), 1018–1024. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965158>
- Reardon, C., Tobin, D. P., Tierney, P., & Delahunt, E. (2017). Collision count in rugby union: A comparison of microtechnology and video analysis methods. *Journal of Sports Sciences*, 35(20), 2028–2034. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1252051>
- Reilly, B., Morgan, O., Czanner, G., & Robinson, M. A. (2021). Automated classification of changes of direction in soccer using inertial measurement units. *Sensors*, 21(14), 4625. <https://doi.org/10.3390/s21144625>
- Robinson, G., & O'Donoghue, P. (2008). A movement classification for the investigation of agility demands and injury risk in sport. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 8(1), 127–144. <https://doi.org/10.1080/24748668.2008.11868428>
- Sabatini, A. M. (2005). Quaternion-based strap-down integration method for applications of inertial sensing to gait analysis. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 43(1), 94–101. <https://doi.org/10.1007/BF02345128>
- Sabatini, A. M. (2011). Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing. *Sensors*, 11(2), 1489–1525. <https://doi.org/10.3390/s110201489>
- Sarmiento, H., Anguera, M. T., Campaniço, J., & Leitão, J. (2010). Development and validation of a notational system to study the offensive process in football. *Medicina (Kaunas)*, 46(6), 401–407.
- Scanlan, A. T., Stanton, R., Sargent, C., O'Grady, C., Lastella, M., & Fox, J. L. (2019). Working overtime: The effects of overtime periods on game demands in basketball players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(10), 1331–1337. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0906>
- Sheppard, J. M., Young, W. B., Doyle, T. L. A., Sheppard, T. A., & Newton, R. U. (2006). An evaluation of a new test of reactive agility and its relationship to sprint speed and change-of-direction speed. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 9(4), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2006.05.019>
- Svilar, L., Castellano, J., Jukic, I., & Bok, D. (2019). Short-term tapering prior to the match: External and internal load quantification in top-level basketball. *Archivos de Medicina del Deporte*, 36(5), 288–295.
- Szigeti, G., Schuth, G., Revisnyei, P., Pasic, A., Szilas, A., Gabbett, T., & Pavlik, G. (2022). Quantification of training load relative to match load of youth national team soccer players. *Sports Health*, 14(1), 84–91. <https://doi.org/10.1177/19417381211004902>

Datos de los/as autores/as y traductor/a:

Roberto Avilés Vicente
Julen Castellano
Jose Pino-Ortega

roberto_aviles1990@hotmail.com
julen.castellano@ehu.es
josepinoortega@um.es

Autor/a
Autor/a
Autor/a

