



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Análisis del Rendimiento de Esquiadores Alpinos Profesionales mediante Sensores IMU

Carla Pérez Chirinos Buxadé

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE ESQUIADORES ALPINOS PROFESIONALES MEDIANTE SENSORES IMU



THE USE OF IMU SENSORS IN PERFORMANCE
ANALYSIS OF PROFESSIONAL ALPINE SKIERS

CARLA PÉREZ-CHIRINOS BUXADÉ

TESIS DOCTORAL 2022

UNIVERSIDAD DE BARCELONA

Facultad de Educación

INSTITUTO NACIONAL DE EDUCACIÓN FÍSICA DE CATALUÑA

Centro de Barcelona

Programa de Doctorado

Actividad Física, Educación Física y Deporte

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE ESQUIADORES ALPINOS
PROFESIONALES MEDIANTE SENSORES IMU**

**THE USE OF IMU SENSORS IN PERFORMANCE ANALYSIS OF
PROFESSIONAL ALPINE SKIERS**

Tesis doctoral presentada por:

Carla Pérez-Chirinos Buxadé

Dirigida por:

Dr. Gerard Moras Feliu

y

Dr. Josep Maria Padullés Riu

Tutorizada por:

Dr. Gerard Moras Feliu

Para optar al título de:

Doctor por la Universidad de Barcelona

Barcelona, 2022

Esta tesis ha sido realizada gracias al apoyo del Instituto Nacional de Educación Física de Cataluña (INEFC) y del Grupo de Investigación en Actividad Física y Salud (GRAfYS, 2017SGR/741).

Carla Pérez-Chirinos Buxadé ha recibido una beca de formación de profesorado universitario (FPU 18/04647) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España, disfrutada entre 2019 y 2022.

Índice de contenidos

Carta de los directores	11
Lista de publicaciones	15
Lista de abreviaturas	19
Lista de tablas.....	21
Lista de figuras	23
Agradecimientos	31
Resumen	37
Resum.....	41
Abstract	45
Motivaciones de la autora	49
1. Introducción	51
1.1. Singularidades del esquí alpino de competición	51
1.2. La curva en el esquí alpino.....	57
1.2.1. La estructura de la curva de esquí	60
1.2.2. La influencia de la geomorfología del terreno y el trazado en la estructura de la curva de esquí	79
1.2.3. Sistemas de análisis del movimiento para caracterizar la estructura de la curva de esquí	82

2. Objetivos de la tesis	99
3. Métodos.....	101
4. Estudios.....	105
4.1. Estudio 1: <i>Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU</i>	107
4.1.1. Ensayo previo.....	109
4.1.2. Publicación.....	129
4.2. Estudio 2: <i>Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings</i>	145
4.2.1. Ensayos previos.....	147
4.2.2. Publicación.....	181
5. Resultados principales.....	197
6. Discusión común.....	199
7. Conclusiones	215
8. Aplicaciones prácticas para el análisis del rendimiento.....	219
9. Limitaciones y perspectivas de futuro.....	233
10. Referencias.....	237
11. Anexos.....	259

Carta de los directores

El Dr. Gerard Moras Feliu, del Instituto Nacional de Educación Física (INEFC) de la Universidad de Barcelona (UB), de Barcelona, España, declara:

La tesis doctoral titulada «**Análisis del rendimiento de esquiadores alpinos profesionales mediante sensores IMU**», presentada por Carla Pérez-Chirinos Buxadé para obtener el título de doctora, ha sido realizada bajo mi supervisión y cumple con los requisitos técnicos y de rigor para poder ser presentada.

Firmo el presente documento:

Firma

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'G' followed by 'M' and 'F' in a cursive script.

Barcelona, mayo de 2022

El Dr. Josep Maria Padullés Riu, del Instituto Nacional de Educación Física (INEFC) de la Universidad de Barcelona (UB), de Barcelona, España, declara:

La tesis doctoral titulada «**Análisis del rendimiento de esquiadores alpinos profesionales mediante sensores IMU**», presentada por Carla Pérez-Chirinos Buxadé para obtener el título de doctora, ha sido realizada bajo mi supervisión y cumple con los requisitos técnicos y de rigor para poder ser presentada.

Firmo el presente documento:

Firma

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Padullés Riu', written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the right.

Barcelona, mayo de 2022

Lista de publicaciones

La presente tesis se presenta por compendio de publicaciones y está formada por dos publicaciones de acceso abierto que se citan en detalle a continuación. En el capítulo *Estudios*, las publicaciones se muestran en su formato original, en orden cronológico y siguiendo los objetivos principales de esta tesis.

Publicación 1:

Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU

Citación:

Pérez-Chirinos Buxadé C, Fernández-Valdés B, Morral-Yepes M, Tuyà Viñas S, Padullés Riu JM, Moras Feliu G. Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU. *Sensors*. 2021;21(5773):1–13. Published 2021 Aug 27. doi:10.3390/s21175773

Información de la revista:

Nombre de la publicación: *Sensors*

ISSN: 1424-8220

Categoría: número especial *Wearable Sensors for Biomechanical Monitoring in Sport*

Factor de impacto: 3,576

Cuartil: Q1

Publicación 2:

Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings

Citación:

Pérez-Chirinos Buxadé C, Padullés Riu JM, Gavaldà Castet D, Trabucchi M, Fernández-Valdés B, Tuyà Viñas S, Moras Feliu G. Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings. *Sensors*. 2022;22(902):1–14. Published 2022 Jan 25. doi:10.3390/s22030902

Información de la revista:

Nombre de la publicación: *Sensors*

ISSN: 1424-8220

Categoría: número especial *Wearable Sensors for Biomechanical Monitoring in Sport*

Factor de impacto: 3,576

Cuartil: Q1

La producción científica de esta tesis también ha sido divulgada en los siguientes congresos:

Pérez-Chirinos Buxadé C, Fernández-Valdés B, Moras Feliu G. Assessing Vertical Drop in Alpine Skiing by two sensors incorporated in an IMU: Barometer versus Global Positioning System measurements. Ponencia presentada en: 25th Annual Congress of the European College of Sport Science; 2020 Nov. 28-30; online.

Pérez-Chirinos Buxadé C, Fernández-Valdés B, Morral-Yepes M, Tuyà Viñas S, Padullés Riu JM, Moras Feliu G. The Use of an IMU Magnetometer as a Timing System. Ponencia presentada en: III Jornada Catalana de Recerca en Ciències de l'Activitat Física i l'Esport; 2021 Jun. 12; Universidad de Vic, España.

Pérez-Chirinos Buxadé C, Fernández-Valdés B, Morral-Yepes M, Tuyà Viñas S, Padullés Riu JM, Moras Feliu G. Validity of a Magnet-Based Timing System using an IMU Magnetometer. Ponencia presentada en: 26th Annual Congress of the European College of Sport Science; 2021 Sept. 8-10; online.

Pérez-Chirinos Buxadé C, Fernández-Valdés B, Morral-Yepes M, Tuyà Viñas S, Padullés Riu JM, Moras Feliu G. Validity of a Timing System in the Alpine Ski Field: A Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU. Ponencia presentada en: Human Kinetics and Alpine Skiing International Conference; 2021 Dic. 2-3; online.

Lista de abreviaturas

CdM	Centro de masas
Fase INI	Fase de inicio de la curva de esquí
Fase STE o STE _{IN+OUT}	Fase de conducción de la curva de esquí
Fase STE _{IN}	Fase de conducción de entrada a la curva de esquí
Fase STE _{OUT}	Fase de conducción de salida de la curva de esquí
FIS	Federación Internacional de Esquí
IMU	Unidad de medida inercial (<i>inertial measurement unit</i>)
M-BTS	Sistema de cronometraje basado en imanes y el magnetómetro del IMU (<i>magnet-based timing system</i>)
MDE	Modelo digital de elevación (<i>digital elevation model</i>)
Prueba de DH	Descenso (<i>downhill</i>)
Prueba de GS	Eslalon gigante (<i>giant slalom</i>)
Prueba de SG	Supergigante (<i>supergiant slalom</i>)
Prueba de SL	Eslalon (<i>slalom</i>)
Tiempo INI	Suma de los tiempos que corresponden a la fase INI de todas las curvas comprendidas en un trazado

Tiempo STE o STE _{IN+OUT}	Suma de los tiempos que corresponden a la fase STE de todas las curvas comprendidas en un trazado
Tiempo STE _{IN}	Suma de los tiempos que corresponden a la fase STE _{IN} de todas las curvas comprendidas en un trazado
Tiempo STE _{OUT}	Suma de los tiempos que corresponden a la fase STE _{OUT} de todas las curvas comprendidas en un trazado
Trazado FS	El trazado más recto en la pendiente suave (<i>flat-straighter</i>)
Trazado FT	El trazado girado en la pendiente suave (<i>flat-turned</i>)
Trazado SS	El trazado más recto en la pendiente pronunciada (<i>steep-straighter</i>)
Trazado ST	El trazado girado en la pendiente pronunciada (<i>steep-turned</i>)
TS	Momento de cambio de curva (<i>turn switch</i>)

Lista de tablas

Todas las tablas son obra de los autores.

Tabla 1. Características de las diferentes pruebas de esquí alpino de competición	54
Tabla 2. Datos de la altitud de cada puerta y del el desnivel entre puertas para las cuatro bajadas analizadas	168
Tabla 3. Comparación <i>inter</i> dispositivo	171
Tabla 4. Comparación de las altitudes y desniveles entre el dGNSS <i>high-end</i> y el GNSS <i>low-end</i>	173
Tabla 5. Comparación de las altitudes y desniveles entre el dGNSS <i>high-end</i> y el barómetro.....	174
Tabla 6. Diferencias relativas entre el dGNSS <i>high-end</i> y el GNSS <i>low-end</i> , y el dGNSS <i>high-end</i> y el barómetro	176
Tabla 7. Resultados principales de los estudios de la tesis	197
Tabla 8. Definición de los parámetros de rendimiento seleccionados ...	220
Tabla 9. Tiempos totales de cada esquiador por cada trazado	222
Tabla 10. Caracterización de los cuatro trazados de SL.....	263

Lista de figuras

Todas las figuras son obra de los autores o tienen los permisos pertinentes para su reproducción.

- Figura 1. Primera competición de esquí en Pista Larga, La Molina (enero de 1996)..... 49
- Figura 2. Desequilibrio debido a la interacción del esquí con la nieve. Fotografía reproducida con el permiso de Albert Palau..... 52
- Figura 3. Diferentes tipos de puertas utilizadas en el esquí alpino de competición. A la izquierda, Núria Pau en el eslalon gigante de los JJ. OO. de Pekín. Este tipo de puertas son las que encontramos en las pruebas de eslalon gigante, supergigante y descenso. A la derecha, Quim Salarich entrenando eslalon en la pista de los JJ. OO. de Pekín. Este tipo de puertas se utilizan exclusivamente en eslalon. Fotografías reproducidas con el permiso de Nacho Casares/Comité Olímpico Español..... 56
- Figura 4. División de la curva de esquí según Raschner (1997). 62
- Figura 5. División de la curva de esquí según Müller *et al.* (1998). LMP, línea de máxima pendiente..... 63
- Figura 6. Delimitación de la curva de esquí según Supej *et al.* (2003). Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS)..... 64
- Figura 7. División de la curva de esquí según Supej *et al.* (2010). r , radio. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una

curva a la siguiente (puntos TS).....	65
Figura 8. División de la curva de esquí según Reid (2010). r , radio. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).....	66
Figura 9. División de la curva de esquí según Spörri <i>et al.</i> (2012). r , radio; CdM, centro de masas. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).....	67
Figura 10. División de la curva de esquí según Gilgien <i>et al.</i> (2018). r , radio. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).....	68
Figura 11. Delimitación de la curva de esquí con un dispositivo IMU. ALAT, aceleración lateral; I , inclinación; ω , velocidad angular. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).....	69
Figura 12. División de la curva de esquí según Bruhin <i>et al.</i> (2020). r , radio.	70
Figura 13. División de la curva de esquí según Nachbauer (1987). F_R es la fuerza de reacción de la nieve.	71
Figura 14. División de la curva de esquí según Müller (1994). LMP, línea de máxima pendiente. F_R es la fuerza de reacción de la nieve.	72
Figura 15. Delimitación de la curva de esquí según Schwameder <i>et al.</i> (2001). M_X es el momento del eje longitudinal de los esquís. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).	73

Figura 16. División de la curva de esquí según Müller y Schwameder (2003). LMP, línea de máxima pendiente. F_R es la fuerza de reacción de la nieve.	74
Figura 17. División de la curva de esquí según Nakazato et al. (2011). F_R es la fuerza de reacción de la nieve.	75
Figura 18. División de la curva de esquí según Vaverka et al. (2012). F_N es la fuerza normal, la componente de la fuerza de la gravedad perpendicular al plano inclinado ($mg \cdot \cos\alpha$); F_R es la fuerza de reacción de la nieve, y F_{LAT} es la fuerza lateral que actúa durante la curva.	76
Figura 19. División de la curva de esquí según LeMaster (2010).	77
Figura 20. Ventajas (verde) e inconvenientes (naranja) de los diferentes sistemas de análisis del movimiento.	97
Figura 21. Esquema sobre la metodología empleada en los dos estudios y en los ensayos de la tesis.	102
Figura 22. Características y variables de medición de los microsensores incorporados en el dispositivo IMU (WIMU, Realtrack Systems, Almería, España) utilizado en esta tesis. * El acelerómetro triaxial funciona con un sensor de capacitancia. Este presenta opciones de medir la aceleración con o sin gravedad, y de tomar como sistema de referencia el propio IMU o la tierra. ** Actualmente, la frecuencia del magnetómetro se ha ampliado a 160 Hz.	103
Figura 23. Diferentes barras magnéticas utilizadas en las diferentes fases de este ensayo.	114
Figura 24. Ilustración de un esquiador en descenso directo con el dispositivo IMU colocado en la zona baja de la espalda.	115

Figura 25. Registros del magnetómetro cuando el esquiador pasó a 0,2 m y a 1 m de distancia con respecto a la barra magnética. Se representa el flujo magnético de los tres ejes del magnetómetro. El eje x es el vertical, el eje y es el lateral y el eje z es el anteroposterior. La señal seleccionada corresponde al momento del descenso directo (entre 3 y 4 s) detectado a través de la sincronización con el vídeo..... 116

Figura 26. Detalle de la colocación de la barra magnética en el lado interior de la primera puerta del trazado. 118

Figura 27. Registros del magnetómetro correspondientes a la segunda bajada del primer esquiador (a) y del segundo esquiador (b). Se representa el flujo magnético de los tres ejes del magnetómetro. El eje x es el vertical, el eje y es el lateral y el eje z es el anteroposterior. Los círculos rojos están indicando la presencia de los picos en la primera y sexta puertas del trazado. Las imágenes del vídeo estaban sincronizadas con el dispositivo IMU y se corresponden con el momento en que el esquiador pasó por cada una de las puertas analizadas..... 119

Figura 28. (a) Posición del esquiador 2 al pasar por la primera puerta del trazado; (b) posición del esquiador 2 al pasar por la sexta puerta del trazado. Las flechas amarillas indican la distancia entre el magnetómetro y la barra magnética. 120

Figura 29. Registro del magnetómetro correspondiente a las cuatro puertas consecutivas de la primera bajada por cada sección. El gráfico a corresponde a la sección de $20,5^\circ$ de pendiente, y el b , a la sección de $15,4^\circ$ de pendiente. Se representa el flujo magnético de los tres ejes del magnetómetro. El eje x es el vertical, el eje y es el lateral y el eje z es el anteroposterior. Las imágenes del vídeo estaban sincronizadas con el dispositivo IMU y corresponden con el momento en que el esquiador

pasaba por cada una de las puertas analizadas. 123

Figura 30. Diagrama del trazado realizado, las tres secciones analizadas, la posición de las barras magnéticas y las fotocélulas. 125

Figura 31. Registro del magnetómetro correspondiente a las cuatro puertas. Se representa el flujo magnético del eje x (vertical). Los recuadros amarillos muestran el tiempo transcurrido entre picos calculado automáticamente con el programa SPRO. Las imágenes estaban sincronizadas con el dispositivo IMU y corresponden al momento en que el patinador pasaba por cada una de las puertas analizadas. 126

Figura 32. Gráficos de regresión lineal (izquierda) y Bland-Altman (derecha) del tiempo medido utilizando el M-BTS frente al tiempo obtenido utilizando fotocélulas. La línea diagonal representa la línea de identidad (pendiente = 1; intercepción = 0). La línea sólida dentro del gráfico representa el sesgo. Las líneas discontinuas representan los límites superior e inferior del 95 % de acuerdo. 127

Figura 33. Modelización del movimiento del esquiador como un péndulo invertido. Definición de los ejes de movimiento para el dispositivo IMU orientado verticalmente. El eje x está alineado con el eje longitudinal del péndulo, el eje y es perpendicular al eje de rotación del péndulo y al eje longitudinal del mismo, y el eje z está alineado con el eje de rotación del péndulo. 151

Figura 34. Registros de una bajada de un esquiador por un trazado de SL. Los círculos naranjas representan las puertas y los cuadros grises representan las ocho curvas completas, delimitadas según cada sensor. Con la señal de aceleración lateral se distinguen la fase INI (cuadros grises oscuros) y la fase STE (cuadros grises suaves) de las curvas de esquí. . 156

Figura 35. Representación de dos curvas consecutivas de SL; la primera, con pie exterior derecho, y la segunda, con pie exterior izquierdo. La primera curva se divide en una fase INI (I) y una fase STE (II-V). La segunda curva se divide en una fase INI (VI) y una fase STE (VII-XI). A su vez, la fase STE se divide en una fase STE _{IN} (II-III para la curva 1 y VII-VIII para la curva 2) y una fase STE _{OUT} (V para la curva 1 y X-XI para la curva 2).....	158
Figura 36. (a) Calibración de los dispositivos IMU en una superficie llana y uniforme. (b) Colocación del dispositivo IMU en la zona baja de la espalda del esquiador. (c) Esquiador realiza una bajada por el trazado con el dispositivo IMU.....	163
Figura 37. A la izquierda, ilustración esquemática de las dos secciones del trazado de SL analizadas. A la derecha, ilustración de las características del trazado con la distancia entre puertas (GD), la distancia vertical (VGD) y la distancia horizontal (GO).....	164
Figura 38. Medición de la posición de una puerta del trazado con el dGNSS <i>high-end</i> en situación estática por Dani Gavaldà Castet	166
Figura 39. FT, el trazado girado en la pendiente suave.....	224
Figura 40. ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada.	225
Figura 41. FS, el trazado más recto en la pendiente suave.....	225
Figura 42. SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada.	226
Figura 43. INI, fase de inicio; STE, fase de conducción; STE _{IN} , fase de conducción de entrada a la curva, y STE _{OUT} , fase de conducción de salida de la curva.	227

Figura 44. FT, el trazado girado en la pendiente suave; ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada; FS, el trazado más recto en la pendiente suave, y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada.	230
Figura 45. Ortofotomapa generado por el software Agisoft®. Cuatro trazados de SL: FT, el trazado girado en la pendiente suave (polígono naranja); ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada (polígono amarillo); FS, el trazado más recto en la pendiente suave (polígono azul), y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada (polígono verde). Las puertas dónde se colocó el imán están resaltadas.....	259
Figura 46. MDE con mapa de curvas de nivel generado por el software Agisoft®.....	260
Figura 47. Mapa de pendientes. Para obtener más información sobre cómo el software ArcGIS calcula la pendiente, consulte el siguiente enlace: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm	260
Figura 48. Mapa de orientaciones. Para obtener más información sobre cómo el software ArcGIS calcula la orientación, consulte el siguiente enlace: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm	261
Figura 49. Captura de la posición de un punto de control mediante un rover GNSS Leica GS18 T RTK.	262

Agradecimientos

A totes les persones que m'han acompanyat i que m'han ajudat en aquest procés.

Als meus directors de tesi, dues persones que transmeten passió pel que fan i que em van obrir les portes per poder aprendre d'elles. Gràcies per haver compartit coneixements, però també vivències. Sento una gran admiració cap a vosaltres.

Al Dr. Gerard Moras Feliu. Gràcies per la confiança dipositada en mi. Durant aquests quatre anys has estat el meu referent acadèmic i m'has guiat pel món de la investigació i la recerca. Un món que pot tenir moltes cares, però que persones com tu fan que valgui la pena. La teva dedicació ha sigut absoluta i el meu reconeixement es queda curt.

Al Dr. Josep Maria Padullés Riu. Gràcies per tant. Són molts els moments que hem compartit: a l'INEFC, a Chronojump de becària, entrenant, de voluntaris a les Fires de la Ciència y la Tecnologia... Moltíssimes gràcies per haver estat sempre allà. Quan penso en tu la primera paraula que em ve al cap és admiració. La segona, sort d'haver-te conegut.

Al Sr. Maxime Tissot. Gràcies per acollir la participació d'un estudi científic a càrrec de l'Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya i per posar a la meva disposició tant els esportistes de nivell nacional com els entrenadors de la Federació Andorrana d'Esquí, tots ells van ser primordials en el desenvolupament de la jornada de recollida de dades per al segon estudi de la tesi.

Al Damià Costa. Gràcies per mostrar interès en aquest projecte i per facilitar-nos el contacte amb la Federació Andorrana.

També vull fer un agraïment especial al Dani Gavaldà. Des del primer minut que et vaig demanar consell per mesurar el terreny de les pistes d'esquí, et vas implicar com ningú. Vas pujar a les pistes amb mi totes les vegades que van ser necessàries, carregats amb tot el material, inclús et vas saltar el confinament comarcal per venir a Andorra a mesurar. Estic segura que l'Àgueda d'Andorra Telecom sempre ens recordarà. Gràcies per la teva implicació en tot el projecte i per la teva capacitat resolutiva.

A l'Isaac i al Willy. Gràcies per haver-nos facilitat la recollida de dades amb els esquiadors de l'equip de tecnificació de l'International Ski School (ISS).

A l'Albert Mallol. Moltíssimes gràcies per passar-me bons contactes per poder recollir dades a la Vall d'Aran i per venir a donar un cop de mà, encara que siguis del lado oscuro, gràcies.

Al grup de TD2 d'ETEVA (Ari, Àlex, Elias, Clàudia, Blanca, Roger, Jordi, Noè), per haver fet de conillets d'índies durant la formació. A Òscar, per las discusiones sobre la fuerza centrípeta de las curvas. A Javi Alonso, por tu participación como esquiador de altísimo nivel en uno de los ensayos que han sido fundamentales para la realización de esta tesis.

Al Jordi Gavaldà, geòleg i especialista en nivologia. Gràcies per dedicar un matí a explicar-me una petita part del món de la neu i les seves característiques.

A la Federació Catalana d'Esports d'Hivern (FCEH) i especialment al Mauri i a l'Ainhoa, que coordinen el grup de tecnificació que es desenvolupa al Centre de Tecnificació d'Espòrts d'Iuern de la Vall d'Aran (CETEI). Gracias por vuestra colaboración en los inicios de esta tesis doctoral y por dejarme participar en los entrenamientos para recoger datos con los esquiadores y esquiadoras del grupo.

Al Ricard, de l'Alpine Line Club d'Esports (ALCE), i als seus esquiadors perquè amb ells vaig començar a fer les primeres proves per familiaritzar-me amb els dispositius IMU. Gràcies per dedicar el vostre temps a que l'esquí alpí progressi.

A Ángel Calero, de la Real Federación Española de Deportes de Invierno (RFEDI). Gracias por mostrar vuestro interés en el proyecto. Esperamos poder colaborar en un futuro.

A Bruno y Miki. Por vuestro soporte en todo momento, simplemente grazie.

A la Sílvia i a la Mònica. Per ser companyes de tesi i per ajudar-nos mútuament. Lucas, gràcies a tu també per ser una persona atenta i ajudar-nos a les tres.

Als companys i companyes que també són personal investigador en formació a l'INEFC (Joana, Xènia, Josuas, M. Carmen, Lia, Lluç...), per haver coincidit en aquesta etapa de les nostres vides. Espero que en un futur ens puguem trobar en alguna universitat.

Al Peter de Realtracksystem. Thank you for always being willing to help us with all our doubts and needs related to WIMU.

A tot el personal de Recerca de l'INEFC. Al Joan Cadefau, a part de ser ceretà, sempre has estat disposat a respondre preguntes i escoltar les meves inquietuds relacionades amb el món de la recerca, gràcies pels teus consells. A la Maribel, per tota la part burocràtica, però sobretot per preocupar-te per nosaltres i per la teva dedicació de tants anys. A la Carme i a la Glòria, per tota l'ajuda que he rebut tramitant la documentació de la beca i els ajuts PARINEFC. A l'Albert, per la paciència que vas tenir amb les reserves dels dispositius IMU. Al Diego, per les vegades que t'has interessat per com

duia la tesi. A la Míriam, per la seva voluntat de fer la feina ben feta i tota l'ajuda rebuda, sobretot en aquest últim període de dipòsit de tesi.

A totes les persones que han format part de l'INEFC durant els últims 10 anys, des que vaig començar com a estudiant l'any 2012. A tots els professors i professores que vaig tenir al grau.

Al Marcel·lí Massafret, gràcies pel temps que vaig estar a l'Acadèmia Sánchez-Casal, i al Joan Solé, gràcies pels esmorzars de Teo dels darrers anys.

A l'Anabel Blasco, per ajudar-nos amb l'estadística.

A tot l'equip Chronojump (Xavis, Jordi, Joan...). Gràcies per compartir coneixements i estar sempre disposats a ajudar amb el que calgui.

Al Roger Blanch, d'AC Magnets. Gràcies per la teva predisposició durant el procés de construcció de les barres magnètiques.

Al Joel Grau, de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Gràcies per acollir-nos a l'ICGC i per donar-nos informació dels vèrtex geodèsics.

A la Diana i al Nacho Casares. Gràcies per deixar-me utilitzar les vostres fotografies. De la mateixa manera, a la Núria Pau i al Quim Salarich per donar-me el permís corresponent.

Al Miki, per ser un recolzament a nivell personal. El meu projecte de tesi es va iniciar al mateix temps que ens vam conèixer. Gràcies per haver estat al meu costat tot aquest temps i per totes les experiències que hem viscut junts. Espero que en compartim moltes més.

A la família del Miki i, en especial, al Joan Oca per haver estat present durant tot el procés de tesi. Has sigut una persona que, tot i venir d'un món completament diferent de l'esquí, m'has ajudat molt amb la teva experiència en el món de la investigació. Gràcies de tot cor.

Als meus amics/gues de vida. Jordina i Mònica, per les nostres escapades a la muntanya, que em donen energia i vitalitat. Butrulls (Kiku, Bernat, Ivan, Pruni), per les festes que hem muntat i les que ens queden. Núria, per estar sempre incondicionalment. Natàlia, per ser la persona més autèntica que he conocido. Al Marc, vam créixer junts i sempre formaràs part de tot allò que construeixi.

A la meva família. Als que estan presents i als que portem al cor. A la meva cosina i al meu cosí, tiets, tietes, iaia Trini, Charo i Titus.

A la meva mare. Per tot el temps que m'has dedicat i tot l'amor que m'has regalat. Gràcies per ser-hi sempre i donar-me tot el teu suport. T'estimo.

Al meu pare. Ets un home de poques paraules, però no et calen perquè els fets parlen per si sols. Gràcies per ensenyar-me el valor del treball i del compromís.

A la meva àvia Carmen. Has sido mi persona, la que está siempre, me equivoque o acierte, para recogerme sin juicios de valor y sin críticas. Gracias por tu amor incondicional, apoyo, escucha, desahogo, confianza, ternura y seguridad. El mayor aprendizaje te lo debo a ti. Te quiero.

Resumen

El esquí alpino es, probablemente, uno de los deportes más desafiantes en lo que al análisis del movimiento se refiere. Las altas velocidades alcanzadas, de entre 40 y 120 km/h, la morfología cambiante del terreno y la diversidad de trazados hacen que explicar el rendimiento de los esquiadores sea todo un reto, sobre todo cuando las diferencias en el *ranking* dependen de centésimas de segundo. En este contexto, fraccionar el tiempo total de la bajada en intervalos de tiempo muy pequeños capaces de medir la duración de elementos clave de la técnica (por ejemplo, la duración de las diferentes fases del viraje de esquí) podría ser esencial para comprender la biomecánica y el rendimiento de este deporte.

En la literatura, las diferentes fases del viraje de esquí se conocen como «la estructura de la curva de esquí¹». Hasta ahora se ha observado que pequeñas diferencias en la estructura de la curva podrían ser decisivas para mejorar el rendimiento de la misma curva². Concretamente, se observa que una fase de inicio más larga se traduce en un mejor rendimiento de la curva.

No obstante, estudiar el rendimiento de una curva de esquí aisladamente se aleja de la realidad de este deporte, en el que se realizan curvas enlazadas por un trazado. Además, cuando un esquiador desciende a altas velocidades, las pequeñas diferencias en la estructura de la curva de esquí son imperceptibles a simple vista (acciones <0,8 s). Por lo tanto, es necesario utilizar sistemas de análisis del movimiento que se adapten a las singularidades del esquí alpino manteniendo la máxima exactitud y

¹ En esta tesis doctoral se ha utilizado el término «curva de esquí» entendido como el resultado del viraje que realiza el esquiador. Así, el viraje describe una curva.

² En esta tesis doctoral se ha utilizado el término «rendimiento de la curva de esquí» entendido como el intervalo de tiempo del viraje que realiza el esquiador. A menor tiempo, mayor rendimiento.

precisión.

Hasta la fecha se han utilizado diferentes métodos de análisis del movimiento, que van desde los sistemas de fotogrametría a través de videograbación a sistemas *wearable*, es decir, sistemas que los deportistas llevan encima, como los de navegación global por satélite (GNSS) y los sensores de fuerza. Todos estos sistemas han permitido detectar las fases de la curva en base a criterios cinemáticos o cinéticos.

En los últimos años, los dispositivos inerciales o, en inglés, *inertial measurement units* (IMU), se han sumado a los sistemas *wearable* de monitorización en el esquí. Estos presentan una serie de ventajas respecto a los sistemas arriba mencionados, ya que son fáciles de usar de manera regular en los entrenamientos y permiten medir a varios esquiadores y bajadas completas en cuestión de minutos sin influir en la técnica de los deportistas.

En la presente tesis se ha comprobado la viabilidad de la utilización de un sistema de análisis que se compone de un dispositivo IMU, fijado en la zona baja de la espalda de los esquiadores, y unos imanes colocados a lo largo del trazado. Con este sistema se pretende evaluar la estructura de la curva de esquí utilizando parámetros biomecánicos, objetivos y cuantificables.

La presente tesis se ha estructurado en dos estudios interrelacionados. El primer estudio ha tenido como objetivo desarrollar y evaluar la validez del M-BTS, un sistema de cronometraje basado en imanes y el magnetómetro del dispositivo IMU. El objetivo del segundo estudio ha sido evaluar la influencia de la estructura de la curva de esquí en el rendimiento de los esquiadores alpinos al bajar por diferentes trazados de eslalon (SL) a través del acelerómetro de un dispositivo IMU y del M-BTS.

En el primer estudio, el M-BTS sirvió para detectar el momento en que el esquiador pasaba por las diferentes puertas del trazado con una resolución de 0,01 s. Este sistema consistió en colocar varios imanes enterrados en la nieve al lado de cada puerta del trazado y colocar un dispositivo IMU en la zona baja de la espalda (L4-L5) de los esquiadores. El magnetómetro integrado en el IMU detectó el campo magnético en forma de pico al pasar cerca de los imanes a una velocidad determinada. Se calculó el tiempo entre picos. El sistema se validó con fotocélulas y se obtuvo una exactitud de $-0,013 \pm 0,020$ s y una precisión (rango de error del 95 %) de 0,050 s en el tiempo total de las bajadas que se realizaron por el trazado de SL que se marcó.

En el segundo estudio se llevó a cabo el marcaje de cuatro trazados de SL: un trazado girado en una pendiente suave (pendiente: 12° ; configuración del trazado: 10,70/4,00 m, para la distancia vertical y la distancia horizontal entre puertas), un trazado girado en una pendiente pronunciada (21° ; 10,70/4,00 m), un trazado más recto en una pendiente suave (12° ; 10,70/3,25 m) y un trazado más recto en una pendiente pronunciada (21° ; 10,70/3,25 m). Cinco esquiadores alpinos de élite completaron varias bajadas por los diferentes trazados a la máxima velocidad. El uso del acelerómetro del dispositivo IMU (1000 Hz) y el M-BTS permitió la detección de las siguientes fases de la curva: inicio (INI), conducción de entrada a la curva (STE_{IN}), conducción de salida de la curva (STE_{OUT}) y conducción total (STE_{IN+OUT}). Para cada bajada se analizaron todas las curvas y sus fases, y se sumaron los tiempos correspondientes a la misma fase, por lo que el tiempo total de una bajada se descompuso en los siguientes tiempos parciales: tiempo INI, tiempo STE_{IN} , tiempo STE_{OUT} y tiempo STE_{IN+OUT} . Independientemente del tipo de trazado, se observaron características similares en la estructura de la curva de esquí para las bajadas más rápidas. Concretamente, estas incrementaron el tiempo INI y

redujeron el tiempo STE_{OUT} , reduciendo así el tiempo STE_{IN+OUT} . El tiempo STE_{IN} no tuvo ninguna influencia en el tiempo total.

Además de identificar cuál es la estructura de la curva de esquí vinculada con los mejores tiempos de la bajada, la presente tesis también aborda la forma en la que esta estructura se ve afectada por la variabilidad del terreno y el trazado. Hasta donde saben los autores, este es el primer estudio que considera conjuntamente diferentes pendientes y diferentes trayectorias³ para estudiar su influencia en la estructura de la curva de esquí. Se observó que los trazados más rectos tuvieron tiempos INI más largos y tiempos STE_{IN+OUT} más cortos que los trazados girados y viceversa. Por otro lado, en los trazados situados en la pendiente más pronunciada se observó un aumento en el tiempo STE_{IN} y una disminución en el tiempo STE_{OUT} .

Actualmente, el conocimiento de los factores que determinan el rendimiento en el esquí alpino es relativamente limitado. La utilización de nuevas tecnologías, como los dispositivos IMU, ya sea individualmente o en combinación con otros sistemas, puede ayudar a desarrollar un enfoque más científico de este deporte, complementando las metodologías empleadas por los entrenadores de base empírica con el análisis y los estudios de base biomecánica.

³ En esta tesis doctoral se ha utilizado el término «trayectoria» entendido como la modificación de la distancia horizontal entre las puertas de un trazado. Así, los trazados girados son los que tienen una mayor distancia horizontal entre puertas y, por tanto, aquellos dónde los esquiadores tendrán que recorrer una mayor trayectoria.

Resum

L'esquí alpí és, probablement, un dels esports més desafiants alhora d'analitzar el moviment. Les altes velocitats que s'assoleixen entre 40 i 120 km/h, la morfologia del terreny canviant i la diversitat de traçats fan que explicar el rendiment sigui tot un repte, sobretot quan les diferències en el rànquing depenen de centèsimes de segon. En aquest context, fraccionar el temps total de la baixada en intervals de temps molt petits capaços de mesurar la durada d'elements clau de la tècnica (per exemple, la durada de les diferents fases del viratge d'esquí) podria ser essencial per comprendre la biomecànica i el rendiment d'aquest esport.

A la literatura, l'estudi de les diferents fases de la corba d'esquí es coneix com «l'estructura de la corba d'esquí⁴». Fins ara només s'ha observat que petites diferències en l'estructura de la corba podien ser decisives per millorar el rendiment de la mateixa corba⁵. Concretament, s'ha observat que una fase d'inici més llarga es tradueix en un millor rendiment de la mateixa corba.

No obstant, estudiar el rendiment d'una corba d'esquí aïllada s'allunya de la realitat de l'esport, on es realitzen corbes enllaçades per un traçat. A més, quan un esquiador realitza una baixada a altes velocitats, les petites diferències en l'estructura de la corba d'esquí són imperceptibles a simple vista (accions <0,8 s). Per tant, cal utilitzar sistemes d'anàlisi del moviment que s'adaptin a les singularitats de l'esquí alpí mantenint la màxima exactitud i precisió.

⁴ En aquesta tesi doctoral s'ha utilitzat el terme «corba d'esquí» entès com a resultat del viratge que realitza l'esquiador. Així, el viratge descriu una corba.

⁵ En aquesta tesi doctoral s'ha utilitzat el terme «rendiment de la corba d'esquí» entès com l'interval de temps del viratge que realitza l'esquiador. A menor temps, major rendiment.

Fins ara, s'han utilitzat diferents mètodes d'anàlisi del moviment, que van des dels sistemes de fotogrametria a través de vídeo-gravació a sistemes *wearable*, és a dir, sistemes que els i les esportistes porten a sobre, com els sistemes de navegació global per satèl·lit (GNSS) i els sensors de força. Tots aquests sistemes han permès detectar les fases de la corba d'esquí en base a criteris cinemàtics o cinètics.

En els darrers anys, els dispositius inercials o, en anglès, *inertial measurement units* (IMU), s'han sumat als sistemes *wearable* de monitoratge a l'esquí. Aquests presenten una sèrie d'avantatges respecte als sistemes esmentats anteriorment ja que són fàcils de fer servir de manera regular en els entrenaments i permeten mesurar diversos esquiadors i baixades completes en qüestió de minuts sense influir en la tècnica dels esportistes.

En aquesta tesi s'ha comprovat la viabilitat de la utilització d'un sistema d'anàlisi que es compon d'un dispositiu IMU, fixat a la zona baixa de l'esquena dels esquiadors, i uns imants col·locats al llarg del traçat. Amb aquest sistema es pretén avaluar l'estructura de la corba d'esquí utilitzant paràmetres biomecànics, objectius i quantificables.

Aquesta tesi s'ha estructurat en dos estudis interrelacionats. El primer estudi ha tingut com a objectiu desenvolupar i avaluar la validesa del M-BTS, un sistema de cronometratge basat en imants i el magnetòmetre del dispositiu IMU. L'objectiu del segon estudi ha estat avaluar la influència de l'estructura de la corba d'esquí en el rendiment dels esquiadors alpins al baixar per diferents traçats d'eslàlom (SL) a través de l'acceleròmetre d'un dispositiu IMU i del M-BTS.

En el primer estudi, el M-BTS, va servir per detectar el moment en què l'esquiador passava per les diferents portes del traçat amb una resolució de

0,01 s. Aquest sistema va consistir en col·locar diversos imants enterrats a la neu al costat de cada porta del traçat i col·locar un dispositiu IMU a la zona baixa de l'esquena dels esquiadors. El magnetòmetre integrat a l'IMU va detectar el camp magnètic en forma de pic en passar a prop dels imants a una velocitat determinada. Es va calcular el temps entre pics. El sistema es va validar amb fotocèl·lules i es va obtenir una exactitud de $0,013 \pm 0,020$ s i una precisió (rang d'error del 95%) de 0,050 s en el temps total de les baixades que es van realitzar pel traçat d'SL que es va marcar.

Al segon estudi, es va realitzar el marcatge de quatre traçats de SL: un traçat girat en un pendent suau (pendent: 12° ; configuració del traçat: 10,70/4,00 m, per a la distància vertical i la distància horitzontal entre portes), un traçat girat en un pendent pronunciat (21° ; 10,70/4,00 m), un traçat més recte en un pendent suau (12° ; 10,70/3,25 m) i un traçat més recte en un pendent pronunciat (21° ; 10,70/3,25 m). Cinc esquiadors alpins d'elit van completar diverses baixades pels diferents traçats a la màxima velocitat. L'ús de l'acceleròmetre incorporat en el dispositiu IMU (1000 Hz) i el M-BTS va permetre la detecció de les següents fases de la corba: inici (INI), conducció d'entrada a la corba (STE_{IN}), conducció de sortida de la corba (STE_{OUT}) i conducció total (STE_{IN+OUT}). Per a cada baixada es van analitzar totes les corbes i les seves fases, i es van sumar els temps corresponents a la mateixa fase, per la qual cosa el temps total d'una baixada es va descompondre en els següents temps parcials: temps INI, temps STE_{IN} , temps STE_{OUT} i temps STE_{IN+OUT} . Independentment del tipus de traçat, es van observar característiques similars a l'estructura de la corba d'esquí per a les baixades més ràpides. Concretament, aquestes van incrementar el temps INI i van reduir el temps STE_{OUT} , reduint així el temps STE_{IN+OUT} . El temps de STE_{IN} no va tenir cap influència en el temps total.

A banda d'identificar quina és l'estructura de la corba d'esquí vinculada amb els millors temps de baixada, aquesta tesi també aborda la forma en que aquesta estructura es veu afectada per la variabilitat del terreny i el traçat. Fins on saben els autors, aquest és el primer estudi que considera conjuntament diferents pendents i trajectòries⁶ d'un traçat per estudiar la seva influència en l'estructura de la corba d'esquí. S'ha observat que els traçats més rectes van tenir temps de INI més llargs i temps de STE_{IN+OUT} més curts que els traçats girats i viceversa. D'altra banda, en els traçats situats al pendent més pronunciat es va observar un augment en el temps STE_{IN} i una disminució en el temps STE_{OUT}.

Actualment, el coneixement dels factors que determinen el rendiment a l'esquí alpí és relativament limitat. La utilització de noves tecnologies, com els dispositius IMU, ja sigui individualment o en combinació amb altres sistemes, pot ajudar a desenvolupar una perspectiva més científica d'aquest esport, complementant les metodologies emprades pels entrenadors de base empírica amb l'anàlisi i els estudis de base biomecànica.

⁶ En aquesta tesi doctoral s'ha utilitzat el terme «trajectòria» entès com la modificació de la distància horitzontal entre les portes d'un traçat. Així, els traçats girats són els que tenen més distància horitzontal entre portes i, per tant, aquells on els esquiadors hauran de recórrer una trajectòria més gran.

Abstract

Alpine skiing is probably one of the most challenging sports for motion analysis. The high speeds of 40 to 120 km/h, the terrain morphology and the diversity of course settings make it complex to explain performance, especially when differences in ranking depend on hundredths of a second. In this context, breaking the total race time into very small-time intervals capable of measuring the duration of key elements of the technique (e.g., the duration of the different phases of the ski turn) could be essential to understand the biomechanics and performance of this sport.

In the literature, the division of the turn cycle into its different phases is known as «the turn cycle structure⁷». To date, it has only been observed that small differences in turn cycle structure could be decisive to improve the performance of the ski turn⁸ itself. Concretely, it has been observed that a longer initiation phase translates into better performance on the turn.

However, studying the performance of an isolated ski turn is far from the reality of the sport, in which turns are linked along a course. Moreover, when a skier descends at high speeds, small differences in turn cycle structure are imperceptible to the naked eye (actions < 0.8 s). Therefore, it is necessary to use motion analysis systems that are able to adapt to the singularities of alpine skiing while maintaining maximum accuracy and precision.

To date, different methods of motion analysis have been used, ranging from

⁷ In this doctoral thesis, «ski turn» is understood as the technical gesture performed by the skier.

⁸ In this doctoral thesis, the term «performance of the ski turn» has been used as the time interval of the turn performed by the skier. The shorter the time, the higher the performance.

video-based photogrammetry systems to wearable systems, such as global navigation satellite systems (GNSS) and force sensors. All these systems have made it possible to detect the phases of the ski turn based on kinematic or kinetic criteria.

In recent years, inertial measurement units (IMUs), have been added to wearable systems for monitoring in the field of alpine skiing. IMUs have a number of advantages over the aforementioned systems as they are easy to use on a regular basis in training on the slopes and allow several skiers and complete runs to be measured in a few minutes without influencing the technique of the athletes.

In the present thesis it has been tested the feasibility of using a motion analysis system consisting of an IMU device, fixed to the lower back of the skiers, and several magnets, placed along a course. This system allows to evaluate the turn cycle structure based on kinematic criteria.

This thesis has been structured in two interrelated studies. The first study aimed to develop and assess the validity of the M-BTS, a timing system based on magnets and the magnetometer of the IMU device. The second study aimed to evaluate the influence of turn cycle structure on the performance of alpine skiers through the accelerometer of an IMU device and the M-BTS when descending different slalom (SL) course settings.

The M-BTS, in the first study, was used to detect the moment at which the skier passed through the different gates of the SL course with a resolution of 0.01 s. The system consisted of placing several magnets buried in the snow next to each gate of the course and placing an IMU device on the lower back of the skiers. The magnetometer integrated in the IMU detected the peak-shaped magnetic field when passing near the magnets at a certain speed. The time between peaks was calculated. The system was validated

with photocells and showed an accuracy of -0.013 ± 0.020 s and a precision (95% error range) of 0.050 s for the total descent times of the SL course.

In the second study, four SL courses were set: a flat-turned course (slope: 12° ; course setting: 10.70/4.00 m, for vertical gate distance and gate offset), a steep-turned course (21° ; 10.70/4.00 m), a flat-straighter course (12° ; 10.70/3.25 m) and a steep-straighter course (21° ; 10.70/3.25 m). Five elite alpine skiers completed several runs on the different SL courses. The use of an IMU accelerometer (1000 Hz) and the M-BTS allowed the detection of the following turn phases: initiation phase (INI), steering phase into the turn (STE_{IN}), steering phase out of the turn (STE_{OUT}) and total steering phase (STE_{IN+OUT}). For each run, all the turns and their phases were analyzed and the times corresponding to the same phase were added together, so that the total time of a descent was decomposed into the following partial times: INI time, STE_{IN} time, STE_{OUT} time and STE_{IN+OUT} time. Regardless of the course setting, similar characteristics were observed in the turn cycle structure for the faster runs. Concretely, fast runs increased the INI time and reduced the STE_{OUT} time, thus reducing the STE_{IN+OUT} time. STE_{IN} time had no influence on the total time.

In addition to identifying which turn cycle structure is linked to the best descent times, how this turn cycle structure is affected by terrain and course setting was also addressed in the present thesis. To the authors' knowledge, this is the first study to consider different slopes and different trajectories⁹ together to study their influence on the turn cycle structure. It has been observed that straighter courses had longer INI times and shorter STE_{IN+OUT} times than turned courses and vice versa. On the other hand, an increase in STE_{IN} time and a decrease in STE_{OUT} time were observed on the courses

⁹ In this doctoral thesis the term «trajectory» has been understood as the modification of the gate offset. Thus, turned courses are those with a greater gate offset and, therefore, those where skiers will have to cover a greater trajectory.

located on the steeper slope.

Currently, our knowledge of the factors that determine performance in alpine skiing is relatively limited. The use of new technologies, such as IMU devices, either individually or in combination with other systems, may help to develop a more scientific approach to the sport, complementing the methodologies employed by empirically based coaches with biomechanical base studies.

Motivaciones de la autora

Prácticamente aprendí a esquiar antes que a caminar. Mi padre me introdujo en este deporte de bien pequeña. De hecho, mi primera carrera la hice en La Molina en el año 1996 y, por aquel entonces, no tenía ni el año y medio cumplido. Era una carrera en la que participaban padres e hijos, y en donde había una única regla: los esquís de los niños debían estar en contacto con la nieve durante toda la carrera.

Desde entonces, el esquí me ha acompañado siempre. Ha sido el deporte al cual me he dedicado, llegando a competir a nivel autonómico y nacional, y que me ha permitido adquirir unos valores humanos y desarrollar una faceta muy importante de mi persona. Sin embargo, más allá del mundo de la competición, para mí el esquí siempre ha significado un nexo con mi familia y, especialmente, con mi padre, quien se enamoró de este deporte y ejerció como entrenador durante 30 años. Creo que una de las enseñanzas que me ha transmitido mi familia ha sido hacer de la pasión la profesión, y esta ha sido, sin duda, una de las principales motivaciones para escribir esta tesis.



Figura 1. Primera competición de esquí en Pista Larga, La Molina (enero de 1996).

Otra de mis principales motivaciones ha sido el hecho de haber coincidido con personas como mis directores de tesis durante el grado. Tanto Gerard como Padu son personas inquietas que les gusta cuestionarse las cosas, debatir, y que han hecho destacables contribuciones al mundo del deporte desde la ciencia. Aunque lo expresan de maneras distintas el mensaje que ambos transmiten es el mismo:

«Medir, primero para mejorar tú, luego para hacer mejorar a los demás y, por último, para que mejore la profesión.» (Dr. Gerard Moras Feliu)

«No more blind training.» (Dr. Josep Maria Padullés Riu)

Por esta razón, cuando surgió la posibilidad de realizar un proyecto como esta tesis, utilizando tecnología *wearable* para medir parámetros biomecánicos del movimiento durante los entrenamientos en pistas, me pareció un reto innovador y, a la vez, una oportunidad. Mi objetivo principal no es otro que aprender sobre el deporte que me apasiona para poder aportar mi granito de arena y hacer que progrese.

1. Introducción

En este capítulo se introduce brevemente el esquí alpino de competición y sus singularidades. Seguidamente se desarrolla, de manera detallada, el estado de la cuestión de la presente tesis, cuyo núcleo es el estudio de la curva de esquí, concretamente: la estructura de la curva de esquí, la influencia que pueden tener el terreno y el trazado sobre esta, y los diferentes sistemas de análisis del movimiento que se han utilizado para analizarla.

1.1. Singularidades del esquí alpino de competición

El esquí alpino de competición es un deporte que presenta una serie de singularidades con respecto a otros deportes, las cuales hacen que sea un deporte fascinante, pero, a la vez, muy difícil de analizar. Las principales características especiales son la variabilidad del entorno en el que se practica, la energía potencial gravitacional como motor principal, las diferentes pruebas de la competición, las características de los trazados, el tiempo como factor que determina el rendimiento en carrera y la estacionalidad de la temporada de competición, que depende de las condiciones de la nieve.

La variabilidad del entorno

El hecho de que el esquí alpino se practique en un entorno variable como la montaña añade incertidumbre con respecto a una serie de condicionantes externos que no son fáciles de controlar y que afectan al rendimiento de los esquiadores. La morfología del terreno, las condiciones de la nieve, la meteorología y la visibilidad son algunos de estos condicionantes. Además, durante la bajada, el deportista debe estar preparado para afrontar situaciones con un conocimiento limitado de la velocidad que alcanzará y

1. Introducción

de cómo sus esquís interactuarán con la superficie de la nieve. Todo ello exige del esquiador una combinación de habilidades técnicas, tácticas y condicionales, así como un gran control motor que facilite su capacidad de adaptación al entorno (1,2).



Figura 2. Desequilibrio debido a la interacción del esquí con la nieve. Fotografía reproducida con el permiso de Albert Palau.

La energía potencial gravitacional

A diferencia de otros deportes, en el esquí es posible alcanzar velocidades que superan las capacidades del deportista, ya que la velocidad generada no depende de la energía producida por el propio deportista sino por la transformación de la energía potencial gravitacional en energía cinética y disipación de energía (3). Entre las principales pruebas que encontramos en la competición, las velocidades pueden oscilar entre 40 y 150 km/h (tabla 1). De hecho, el esquí ha sido reconocido como el deporte no motorizado más rápido de la tierra (4). A estas velocidades hay muchos aspectos imperceptibles a simple vista, lo que pone en evidencia la necesidad de utilizar sistemas de análisis del movimiento que sean suficientemente precisos y que complementen el análisis de los entrenadores en base a datos objetivos.

Las pruebas del esquí alpino de competición

Actualmente podemos distinguir entre cuatro pruebas principales de esquí alpino: el eslalon (SL), el eslalon gigante (GS), el supergigante (SG) y el descenso (DH). A su vez, estas cuatro pruebas se agrupan en disciplinas técnicas (SL y GS) y disciplinas de velocidad (SG y DH). Las disciplinas técnicas se caracterizan por un mayor número de curvas y una menor velocidad, y las disciplinas de velocidad se caracterizan por alcanzar mayores velocidades y realizar un número más reducido de curvas (tabla 1). También existe la prueba combinada, que es la más antigua de todas. Esta consiste en hacer una bajada de SL y una de DH; el tiempo total de ambas pruebas determina la clasificación.

En los Juegos Olímpicos de Pionchang (2018) se incorporó una nueva prueba por equipos de naciones que consiste en un paralelo de SL: dos esquiadores de nacionalidades distintas bajan simultáneamente por dos trazados de SL que tienen las mismas características y están situados uno al lado del otro. Esta es la primera prueba donde se compite por equipos de naciones mixtos, es decir, conformados por esquiadores y esquiadoras.

En resumen, el programa actual cuenta con un total de cinco pruebas para cada categoría y una mixta.

La mayoría de los esquiadores olímpicos se especializan en las pruebas de las disciplinas técnicas o de velocidad. No obstante, también están los que son especialistas en una sola prueba y los que compiten en todas las disciplinas y, por lo tanto, hacen todas las pruebas. También es habitual que los especialistas en las disciplinas de velocidad entrenen SL para preparar la prueba combinada y viceversa. La reciente incorporación del paralelo de SL también ha aumentado la atención a esta disciplina.

Tabla 1. Características de las diferentes pruebas de esquí alpino de competición

	SL		GS		SG		DH		Combinada				SL paralelo
									SL		DH		Equipo
	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	
Número de bajadas	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1-4
Tiempo de la mejor bajada (s)	49,79	52,09	62,93	57,34	79,94	73,51	102,69	91,87	47,56	52,25	103,12	92,42	23,53
Velocidad media/máx. (km/h)	54		65/85		86/110		94/150		N/D		N/D		N/D
Número de puertas (1ª o 1ª/2ª bajada)	67/64	65/65	49/47	47/46	45	39	40	37	68	63	40	37	21
Longitud del trazado (m)	N/D		1021	1021	2267	1984	3152	2704	N/D		3152	2704	N/D
Desnivel del trazado (m)	211	211	424	424	645	540	894	765	211	211	894	765	116

Tabla propia basada en los datos de la Federación Internacional de Esquí (FIS) de los Juegos Olímpicos de Pekín de 2022 (5). SL, eslalon; GS, eslalon gigante; SG, supergigante; DH, descenso; H, hombres; M, mujeres; N/D, no disponible. Las velocidades corresponden a resultados de otros estudios (6–9) y podrían diferir ligeramente de la velocidad de las pruebas de los JJ. OO. En el SL paralelo, cada equipo puede realizar un mínimo de una bajada si es eliminado en los octavos de final, o un máximo de cuatro bajadas si pasa a la final (5).

Las características de los trazados

Para cada prueba, la Federación Internacional de Esquí (FIS) determina una reglamentación en cuanto al marcaje del trazado (10). No obstante, esta reglamentación es muy general y da mucha libertad para que los marcajes de una misma prueba tengan características muy diferentes.

Los trazados se señalizan a través de referencias visuales en forma de palo o doble palo con una bandera que los une, las denominadas «puertas» (figura 3). Para cambiar las características del trazado solamente es necesario modificar las distancias entre las puertas dentro del rango establecido por la FIS, lo que todavía añade más incertidumbre a la bajada. Cada trazado se debe bajar de manera individual y es el mismo para todos los esquiadores que compiten en una misma categoría. Solamente se realiza una bajada por trazado. En las pruebas donde se realizan dos bajadas (primera y segunda manga), se debe cambiar el trazado.

El tiempo como factor que determina el rendimiento en carrera

En el esquí alpino de competición, el rendimiento viene determinado por el tiempo total de la bajada (11). No obstante, el tiempo total es un parámetro que por sí solo no aporta información sobre por qué razón un esquiador es mejor que otro. Además, hoy en día, el nivel de exigencia de la competición es tal que las diferencias para ganar se determinan por centésimas de segundo (0,01 s) (11,12), lo que obliga a buscar otros parámetros biomecánicos que permitan explicar el rendimiento de élite de una manera más detallada y matizada (13).

La estacionalidad de la temporada de competición

La disponibilidad de buenas condiciones de entrenamiento (nieve)

1. Introducción

determinará en gran medida los días de entrenamiento en las pistas de esquí que tendrá la temporada de competición. En un estudio realizado en 2018 sobre el entrenamiento de esquiadores olímpicos (1) se observó que, en una temporada de competición de entre 130 y 150 días esquiabiles, el tiempo de entrenamiento efectivo, es decir, aquel en el que el esquiador realiza bajadas por un trazado o similar, no supera las 9,2 horas en el caso de un esquiador de disciplinas técnicas, y no supera las 7,1 horas en el caso de un esquiador de disciplinas de velocidad. Esto se debe a la naturaleza del propio deporte, en el que las bajadas tienen una duración muy corta (entre 30 y 60 segundos) en comparación con el tiempo que se tarda en subir. Esto hace que, en una mañana de entrenamiento en la que se realicen una media de ocho bajadas, el tiempo de entrenamiento será inferior a 6 minutos. En este contexto, es necesario el análisis exhaustivo de la técnica y el rendimiento de los esquiadores para tomar decisiones acertadas sobre qué aspectos hay que priorizar en los entrenamientos en pista.

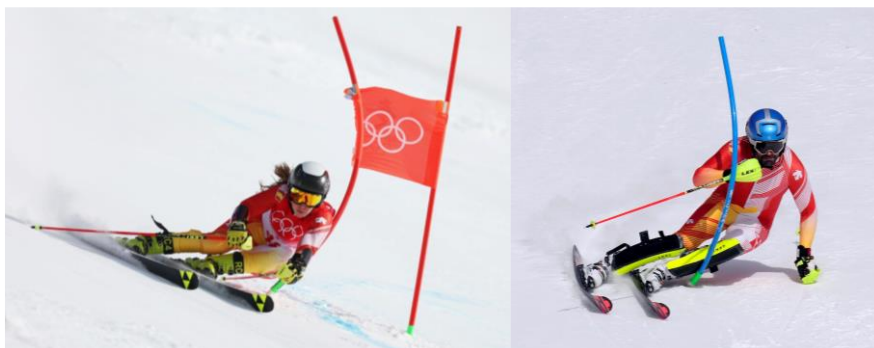


Figura 3. Diferentes tipos de puertas utilizadas en el esquí alpino de competición. A la izquierda, Núria Pau en el eslalon gigante de los JJ. OO. de Pekín. Este tipo de puertas son las que encontramos en las pruebas de eslalon gigante, supergigante y descenso. A la derecha, Quim Salarich entrenando eslalon en la pista de los JJ. OO. de Pekín. Este tipo de puertas se utilizan exclusivamente en eslalon. Fotografías reproducidas con el permiso de Nacho Casares/Comité Olímpico Español.

1.2. La curva en el esquí alpino

La curva de esquí es el elemento técnico fundamental para la regulación de la velocidad. En competición, el objetivo es realizar curvas por un trazado perdiendo la menor velocidad posible, lo que hace que sea un tema de interés tanto para los entrenadores como para los investigadores (6,13,22–29,14–21).

Desde el punto de vista de la biomecánica se ha visto que, para reducir el tiempo de las curvas, las trayectorias más cortas no son necesariamente las más rápidas, pues estas requieren radios más pequeños alrededor de las puertas y una fuerza de reacción de la nieve más pronunciada, lo que correlaciona con una mayor disipación de la energía y una pérdida de velocidad (3,30). Contrariamente, curvas más largas que se inician mucho antes de la puerta (3,19) y se completan más cerca de la puerta (3,19,31) minimizan la disipación de energía (13,19,30) y ayudan al mantenimiento de la velocidad. Entender esto es clave ya que, mientras que las diferencias aisladas en la trayectoria solo afectan momentáneamente al rendimiento, la energía disipada innecesariamente sigue afectando a las secciones posteriores del trazado hasta que se llega a recuperar la velocidad perdida (19,30,32). Por este motivo se ha concluido que una mayor velocidad es más ventajosa que una trayectoria más corta (33).

Aunque se han adquirido muchos conocimientos sobre las curvas y los factores que afectan al rendimiento del esquí gracias a la biomecánica, todavía hay aspectos sobre los que no se tiene suficiente conocimiento. En este sentido se ha apuntado que el estudio de la división de la curva de esquí en sus diferentes fases, lo que se conoce en la literatura como la «estructura de la curva de esquí» (6), podría ser esencial para comprender la biomecánica y el rendimiento de este deporte (20,34). Hasta la fecha solo se han encontrado algunos autores que han observado cómo pequeñas

1. Introducción

diferencias en la estructura de la curva podrían ser decisivas para mejorar el rendimiento de la misma curva (19,35,36).

No obstante, estudiar el rendimiento de una curva de esquí aisladamente se aleja de la realidad de este deporte, en el que se realizan curvas enlazadas por un trazado. Con esta idea en mente, parece interesante para los entrenadores y profesionales tener conocimiento en torno a cómo podría influir la estructura de la curva de esquí en el rendimiento de una bajada por un trazado; es decir, saber cuál es la estructura de la curva, si la hay, que está directamente vinculada con mejores tiempos de bajada. Esto ayudaría a tener una visión clara para la identificación de aspectos clave de mejora.

Al mismo tiempo, la estructura de la curva de esquí puede verse afectada por la geomorfología del terreno y las características del trazado. El esquí alpino de competición requiere que los esquiadores bajen por multitud de trazados, que siguen unas especificaciones generales de la FIS, pero la persona responsable del marcaje del trazado tiene libertad para elegir sus características principales e incluso marcar dentro del mismo trazado secuencias de puertas diferentes. En este sentido, es posible encontrar secuencias donde la distancia horizontal entre puertas sea muy reducida y, por lo tanto, el esquiador pueda seguir una trayectoria más recta; secuencias donde la distancia horizontal sea mayor y esto obligue a seguir una trayectoria más girada; secuencias que sigan un patrón rítmico muy similar; otras que tengan cambios de ritmo, y un largo etcétera. A su vez, los trazados estarán sujetos a la geomorfología que presente el terreno, como las diferentes pendientes. Estas singularidades del esquí alpino dan importancia a la capacidad de los deportistas de adaptarse a cada situación. Además de identificar cuál es la estructura de la curva de esquí vinculada con los mejores tiempos de bajada, la forma en la que esta estructura se ve afectada por la geomorfología del terreno y el tipo de trazado parece de

1. Introducción

extrema importancia para abordar el entrenamiento de forma eficaz.

Finalmente, cuando un esquiador desciende a más de 40 km/h (6–9), las pequeñas diferencias en la estructura de la curva de esquí son imperceptibles a simple vista. Por este motivo, es necesario utilizar sistemas de análisis del movimiento capaces de medir con la máxima exactitud y precisión. En la prueba de SL, por ejemplo, la duración de las curvas es de 0,8 s (1) aproximadamente, y la duración de las fases de la curva puede oscilar entre el 23 y el 65 % del tiempo total de la curva (37). Para el análisis de acciones de tan corta duración, las frecuencias de muestreo de los sistemas de medida deben ser altas a fin de cumplir con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. Además, deben ser sistemas que permitan adaptarse a las singularidades del esquí. Hasta la fecha, para detectar las fases de la curva de esquí se han utilizado diferentes métodos de análisis del movimiento, que van desde los sistemas de fotogrametría a través de videograbación (19,22,32,38–41) a sistemas *wearable*, es decir, sistemas que los deportistas llevan encima, como los de posicionamiento global por satélite (GNSS) (42–45) y los sensores de fuerza (16,18,20,46,47). Todos estos sistemas han permitido detectar las fases de la curva en base a criterios cinemáticos o cinéticos, objetivos y comparables.

En los últimos años, los dispositivos inerciales o, en inglés, *inertial measurement units* (IMU), se han sumado a los sistemas *wearable* de monitorización en el esquí. Estos presentan una serie de ventajas respecto a los sistemas ya mencionados por su practicidad a la hora de ser utilizados en los entrenamientos en pistas, ya que permiten medir a varios esquiadores y bajadas completas en cuestión de minutos sin influir en la técnica de los deportistas. Además, el hecho de que todos los sensores incorporados (acelerómetro, giroscopio, receptor GNSS, barómetro, magnetómetro, etc.) estén sincronizados optimiza la recogida de datos. Estos sistemas no

dependen de la meteorología ni de la visibilidad de los satélites y son capaces de detectar el paso de los esquiadores por las diferentes puertas del trazado con una alta precisión. Este último factor será clave, ya que permitirá analizar la estructura de las curvas en función del trazado (6,19,22).

En la presente tesis se ha querido comprobar la viabilidad del uso los dispositivos IMU para caracterizar la estructura de la curva de esquí. En el ámbito del esquí alpino se ha demostrado que se pueden detectar y delimitar las curvas de esquí con un solo dispositivo IMU a través de la inclinación de la pelvis (46) o de los datos basados en la aceleración lateral del tronco (48) o la velocidad angular de la bota (25). Estas dos últimas, han demostrado tener mayor exactitud y precisión (26). No obstante, ninguno de los estudios mencionados ha analizado la estructura de la curva de esquí.

1.2.1. La estructura de la curva de esquí

El estudio de la estructura de la curva de esquí, es decir, la división de la curva de esquí en sus diferentes fases, es esencial para obtener un análisis más detallado del rendimiento de la propia curva (6,19). Actualmente no existe un consenso sobre en cuántas fases dividir la curva. Hay autores que han dividido la curva en dos (15–18), tres (6,19–21,49) o cuatro fases (22,23). Se han utilizado criterios cinemáticos (14,17,19,21,22,38) y cinéticos (15,16,18,20,47) para delimitar las fases de la curva en base a parámetros objetivos y comparables. No obstante, también encontramos autores que han hecho propuestas con criterios subjetivos en base a su amplia experiencia (50).

A continuación se presenta una revisión de la literatura sobre cómo diferentes autores han dividido la curva de esquí y han descrito sus fases

individuales en base a criterios objetivos (cinemáticos y cinéticos) y subjetivos.

Las fases de la curva a partir de criterios cinemáticos

Los criterios cinemáticos son aquellos que se obtienen de sistemas que miden las fases de la curva a partir del estudio de las posiciones de los segmentos corporales y de las trayectorias que siguen tanto el centro de masas¹⁰ (CdM) del esquiador como sus esquís.

Para determinar las fases de la curva con criterios cinemáticos, dos de los sistemas más relevantes según la literatura son los sistemas basados en fotogrametría a partir de videgrabación (19,22,32,38–40) y los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) (42–45) (para ver sus características con más detalle, consulte las págs. 83 y 86).

En su disertación, Raschner (1997) (17) dividió el arco de la curva de SL en dos fases: (a) la fase de inicio y (b) la fase de conducción. La fase de inicio comienza con un movimiento vertical del esquiador, que sirve para aligerar la presión ejercida por el esquiador sobre los esquís, y termina con los esquís orientados hacia la nueva dirección. La fase de conducción comienza con la nueva orientación de los esquís y termina con el inicio del movimiento vertical nuevamente.

¹⁰ En esta tesis doctoral se ha utilizado el término «centro de masas» entendiéndolo que coincide con el término «centro de gravedad» cuando el cuerpo está en un campo gravitatorio uniforme. A efectos prácticos esta coincidencia se cumple con precisión aceptable para casi todos los cuerpos que están sobre la superficie terrestre, por este motivo, en esta tesis se ha utilizado el término CdM.

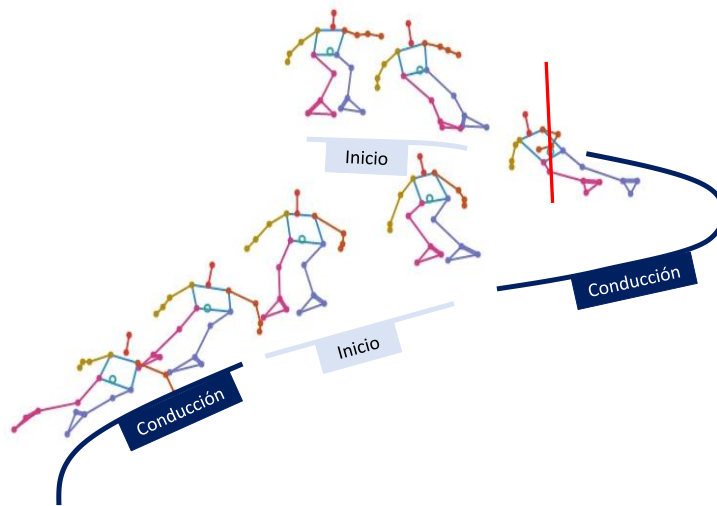


Figura 4. División de la curva de esquí según Raschner (1997).

Müller *et al.* (1998) (21) contribuyeron significativamente a definir con precisión las fases de la curva a partir de fotogrametría basándose en el análisis cinemático de 14 segmentos corporales definidos a partir de 20 puntos anatómicos. Dividieron la curva en dos fases: (a) la fase de inicio y (b) la fase de conducción. En la fase de inicio, el esquiador minimiza la presión del peso corporal sobre los esquís, cambia los cantos y gira los esquís en la dirección de la nueva curva. En la fase de conducción, el esquiador cambia la dirección de su momento angular, conduciendo la curva mediante la regulación del ángulo de canteo del esquí. A su vez, basándose en el cruce de la línea de máxima pendiente, la fase de conducción se divide en dos: (c) la fase de conducción hacia la línea de máxima pendiente y (d) la fase de conducción fuera de la línea de máxima pendiente. Este enfoque tiene sentido desde el punto de vista de la mecánica, ya que, antes del paso de la línea de máxima pendiente, las fuerzas de reacción de la nieve y gravitacionales trabajan juntas para hacer girar al esquiador, mientras que, después del paso de la línea de máxima

pendiente, la fuerza de reacción de la nieve debe trabajar contra la fuerza gravitacional para hacer girar al esquiador (51).

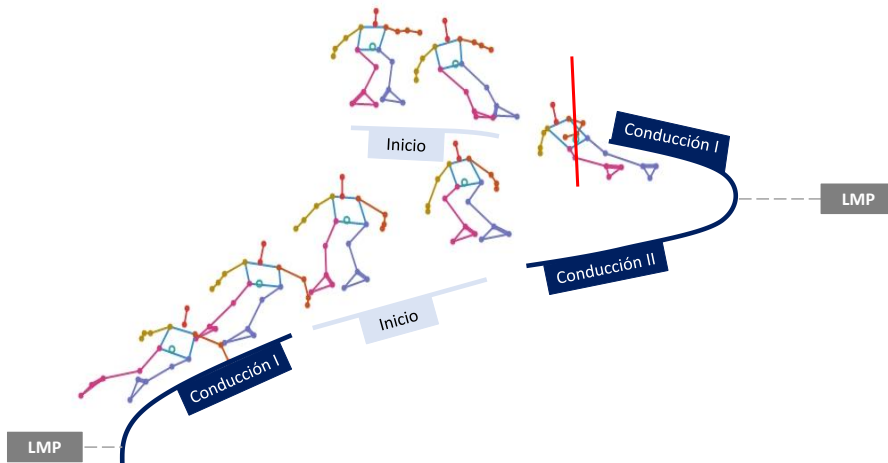


Figura 5. División de la curva de esquí según Müller *et al.* (1998). LMP, línea de máxima pendiente.

También mediante fotogrametría, Supej *et al.* (2003) (24) definieron por primera vez, a partir de criterios cinemáticos, el momento de cambio de una curva a la siguiente, denominado «punto TS», del inglés «*turn switch point*». Se definió como el punto de intersección entre la trayectoria del CdM del esquiador proyectada sobre la superficie de la nieve y la trayectoria promedio de ambos esquís. El punto TS ha sido considerado la referencia en la literatura para delimitar curvas consecutivas y ha ayudado en estudios posteriores a definir las fases de la curva (6,19,22).

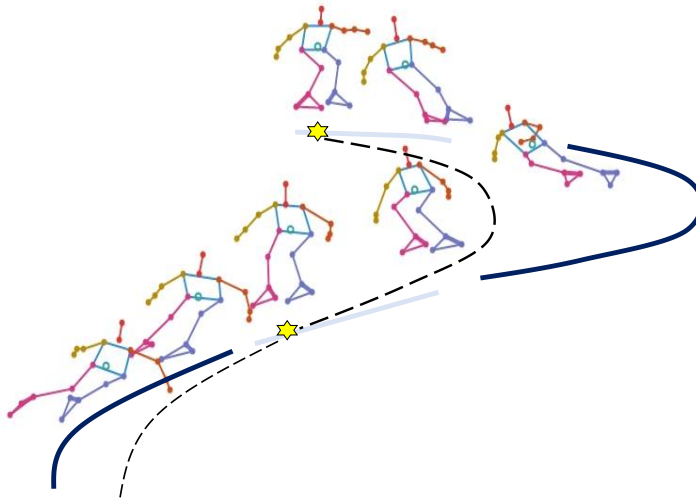


Figura 6. Delimitación de la curva de esquí según Supej *et al.* (2003). Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).

Supej *et al.* (2010) (22), basándose en el criterio que establecieron para delimitar la curva (24), definieron la curva en cuatro fases: (a) la fase de inicio I, (b) la fase de conducción I, (c) la fase de conducción II y (d) la fase de inicio II. La fase de inicio I queda delimitada entre el punto TS y el momento en que la media aritmética del radio de la curva dibujada por el esquiador es inferior a 15 m (15 m era el radio del esquiador utilizado). En las fases de conducción I y II, el radio de la curva dibujada por el esquiador es inferior a 15 m. La posición de la puerta marca la separación entre las fases de conducción. La fase de inicio II queda delimitada entre el punto donde el radio vuelve a ser superior a 15 m hasta el siguiente punto TS.

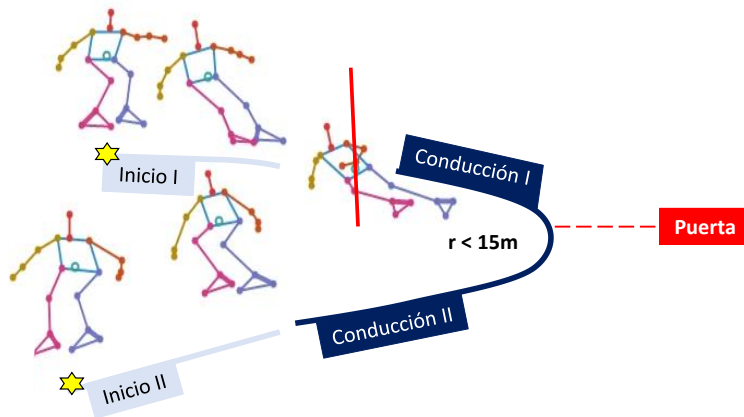


Figura 7. División de la curva de esquí según Supej *et al.* (2010). r , radio. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).

Reid (2010) (6), de manera semejante, a partir de fotogrametría definió tres fases: (a) la fase de inicio, (b) la fase de conducción y (c) la fase de finalización. La fase de conducción es la única donde el radio de curva es inferior a 15 m y las fases de inicio y finalización quedan delimitadas por el punto TS definido según Supej *et al.* (24).

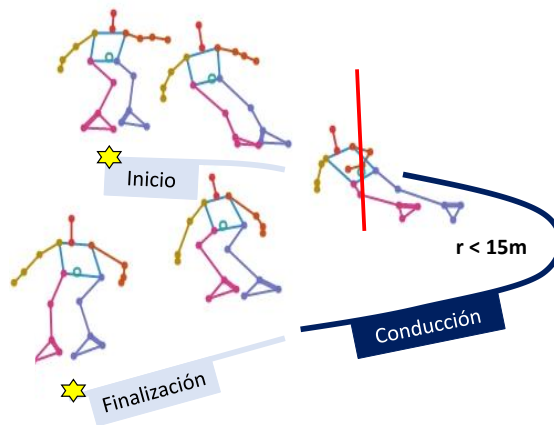


Figura 8. División de la curva de esquí según Reid (2010). r , radio. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).

Spörri *et al.* (2012) (52) usaron el mismo criterio que Reid (2010) (6) para dividir las curvas de esquí de su estudio. La única diferencia fue que la fase de conducción se denominó «fase de cambio de dirección del CdM». Esta fase es la única en la que el radio de curvatura es inferior a 30 m (30 m era el radio del esquí utilizado). Además, se propuso otra división de la curva en dos secciones: sección prepuerta y sección postpuerta.

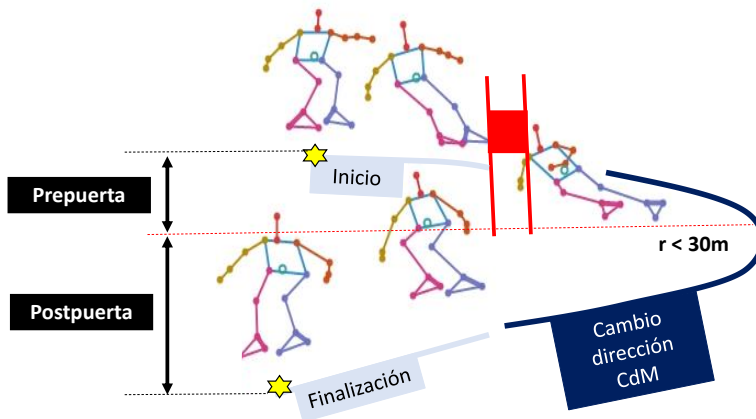


Figura 9. División de la curva de esquí según Spörri *et al.* (2012). r , radio; CdM, centro de masas. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).

Gilgien *et al.* (2018) (44) utilizaron un sistema GNSS para delimitar las fases de la curva en GS, SG y DH. Definieron el punto TS de una curva a la siguiente como el momento de cambio de signo de la velocidad angular, tal y como se describe en (53). A su vez, dividieron la curva en dos secciones: sección prepuerta y sección postpuerta. Consideraron que la fase de curva quedaba delimitada por la zona en la que el radio del CdM era inferior a 125 m.

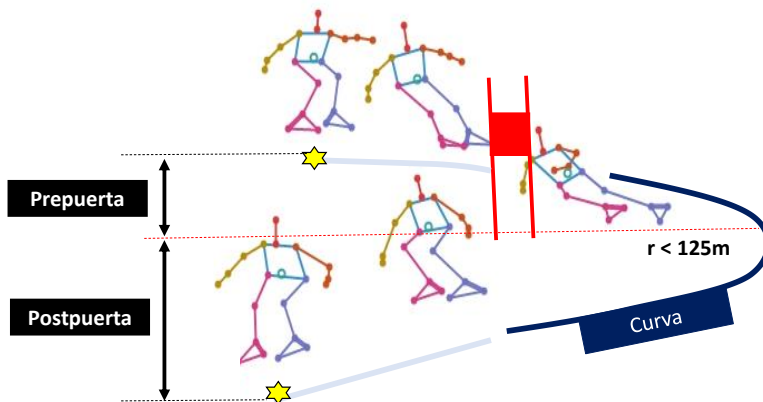


Figura 10. División de la curva de esquí según Gilgien *et al.* (2018). r , radio. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).

Yamagiwa *et al.* (2014) (48), Yu *et al.* (2016) (46) y Martínez *et al.* (2019) (25) demostraron que el punto de TS puede detectarse con el uso de un solo IMU a través de la aceleración lateral del tronco, la inclinación de la pelvis y la velocidad angular de la bota, respectivamente (véanse más detalles en la pág. 149). Cabe destacar que estos métodos solamente permiten delimitar una curva, pero no sus fases.

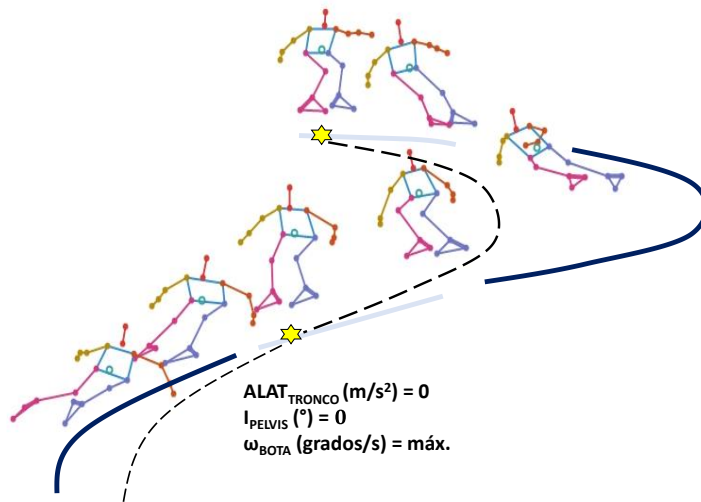


Figura 11. Delimitación de la curva de esquí con un dispositivo IMU. ALAT, aceleración lateral; I, inclinación; ω , velocidad angular. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).

Bruhin *et al.* (2020) (36) realizaron un estudio piloto y utilizaron el receptor GNSS de un dispositivo IMU para delimitar las fases de la curva en un trazado de GS. A partir de la trayectoria recorrida por el esquiador y del cálculo del radio de curvatura, dividieron la curva en las siguientes fases: (a) fase de deslizamiento, (b) fase de inicio y (c) fase de finalización.

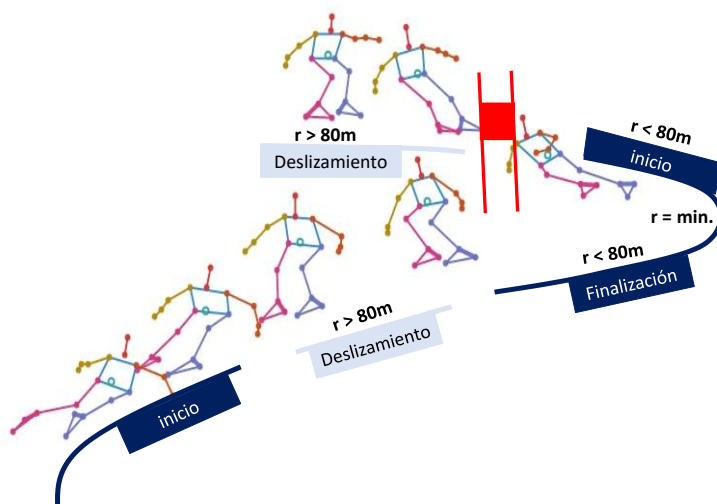


Figura 12. División de la curva de esquí según Bruhin *et al.* (2020). r , radio.

Las fases de la curva a partir de criterios cinéticos

Los criterios cinéticos son aquellos que se obtienen de sistemas que miden la interacción entre el esquiador y los esquís, y utilizan la medición de las fuerzas de reacción de la nieve para determinar las fases de la curva.

Para determinar las fases de la curva de esquí a partir de criterios cinéticos, los sistemas más utilizados son las plantillas de presión (18,20,46), las plataformas de fuerza portátiles (16,47) y las galgas extensiométricas (16,54) (véanse más detalles en la pág. 89).

Nachbauer (1987) (15) dividió la curva en dos fases principales basándose en las mediciones de la fuerza de reacción de la nieve: (a) la fase de preparación y (b) la fase de la curva en sí. En la fase de preparación se minimiza la presión del peso corporal sobre los esquís para reducir la fuerza de reacción de la nieve. Además, el esquiador empieza a transferir el peso al que será el nuevo esquí exterior. En la fase de curva, el esquiador se

1. Introducción

inclina hacia el interior de la curva, se cantean los esquís en la nieve y aumenta la fuerza de reacción de la nieve.

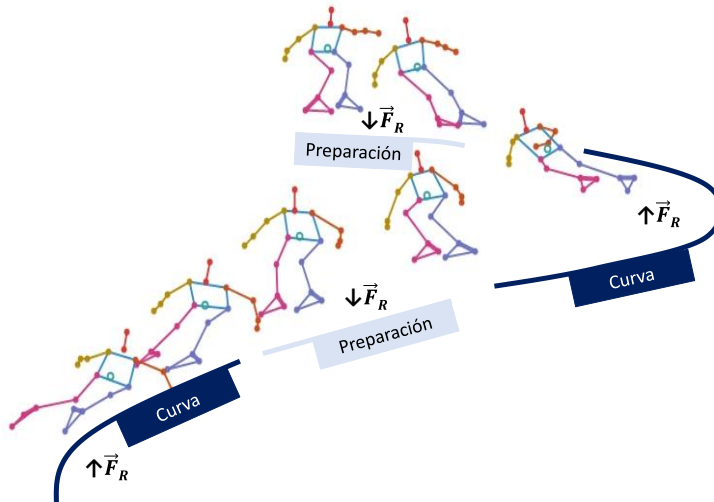


Figura 13. División de la curva de esquí según Nachbauer (1987). F_R es la fuerza de reacción de la nieve.

Müller (1994) (16), con la ayuda de galgas extensiométricas ubicadas entre el esquí y la bota, midió la fuerza de reacción de la nieve tanto del pie exterior como del pie interior de la curva. Lo hizo de manera independiente en el talón, en el metatarso y en las zonas interna y externa del pie. Dividió la curva en dos fases principales: (a) la fase de inicio y (b) la fase de conducción. La fase de inicio se caracteriza por una reducción de la presión ejercida por el esquiador sobre la nieve, la realización del cambio de cantos y el cambio de dirección. En la fase de conducción aumenta nuevamente la presión ejercida por el esquiador sobre la nieve. Esta fase se divide en: (c) fase de conducción hacia la línea de máxima pendiente y (d) fase de conducción fuera de la línea de máxima pendiente.

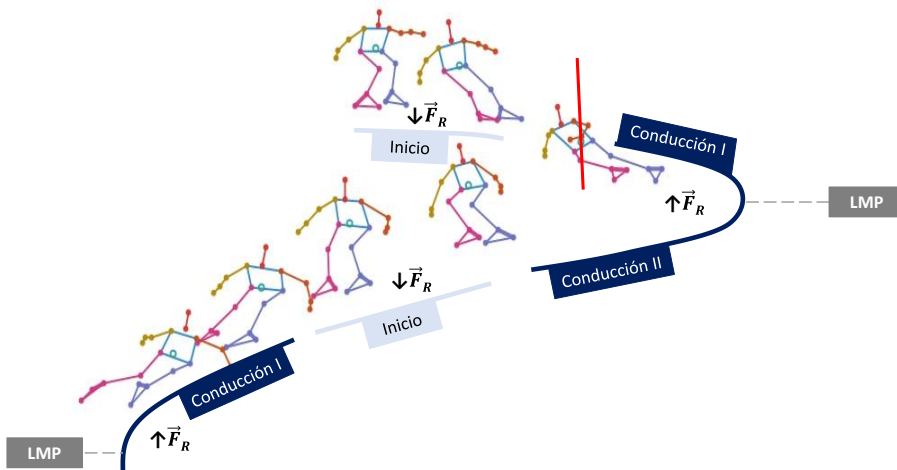


Figura 14. División de la curva de esquí según Müller (1994). LMP, línea de máxima pendiente. F_R es la fuerza de reacción de la nieve.

Schwameder *et al.* (2001) (47) también utilizaron galgas extensométricas ubicadas entre el esquí y la bota para medir tres componentes de fuerza y tres momentos para cada esquí. Concretamente, utilizaron el momento sobre el eje longitudinal de los esquís como punto de partida para separar curvas consecutivas. El principio de esta división fue determinar los valores cero de ese momento. Cada curva quedaba delimitada entre dos valores cero. Cabe destacar que este método solamente permitía delimitar una curva, pero no sus fases.

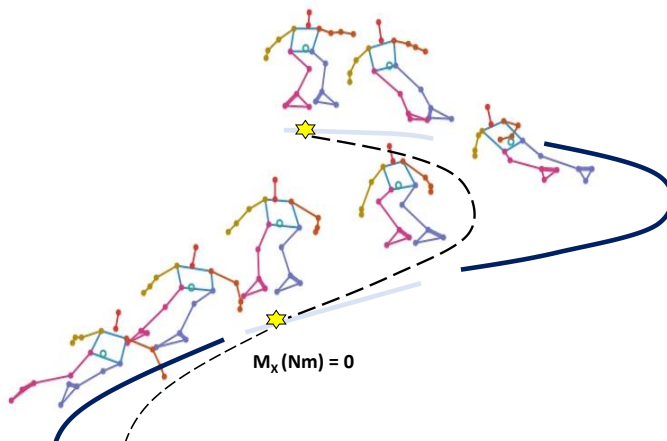


Figura 15. Delimitación de la curva de esquí según Schwameder *et al.* (2001). M_x es el momento del eje longitudinal de los esquís. Las referencias de color amarillo representan el momento de cambio de una curva a la siguiente (puntos TS).

Müller y Schwameder (2003) (20) combinaron criterios cinéticos y cinemáticos para describir las fases de la curva. A través de plantillas de presión y de fotogrametría midieron la fuerza de reacción de la nieve y el ángulo de la rodilla de ambas piernas, respectivamente. Dividieron la curva en dos fases: (a) la fase de inicio y (b) la fase de conducción. En la fase de inicio se registran los valores de fuerza de reacción de la nieve más bajos, y los esquiadores llegan a la máxima extensión de las piernas. (Actualmente, las técnicas más efectivas tanto de eslalon como de gigante han cambiado, y la liberación de la presión no siempre coincide con la extensión de las piernas sino con la flexión de las mismas (55–57)). La fase de conducción se divide en: (c) fase de conducción hacia la línea de máxima pendiente, donde se registra un aumento de las fuerzas de reacción de la nieve, que se distribuyen equitativamente entre ambas piernas, y se registran unos ángulos de la rodilla de la pierna exterior constantes entre 125 y 135°, y (d) fase de conducción fuera de la línea de máxima pendiente, en la que se registran las mayores fuerzas de reacción de la nieve,

1. Introducción

aproximadamente un 180 % del peso corporal —la distribución de las fuerzas deja de ser equitativa y recae principalmente en la pierna exterior—, los ángulos de la rodilla de la pierna exterior permanecen constantes y los ángulos de la pierna interior se reducen hasta llegar a alcanzar los 95°.

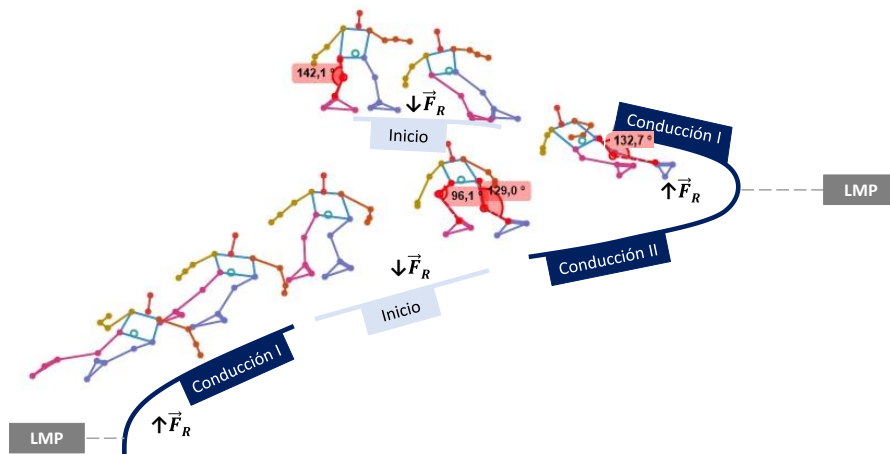


Figura 16. División de la curva de esquí según Müller y Schwameder (2003). LMP, línea de máxima pendiente. F_R es la fuerza de reacción de la nieve.

Nakazato *et al.* (2011) (58) se basaron en la medición de la fuerza de reacción de la nieve a partir de plantillas de presión y plataformas de fuerza portátiles. Propusieron una división de la curva en dos fases: (a) la fase de *unloading*, o descarga, donde se libera la presión ejercida por el esquiador contra la nieve y se produce el cambio de cantos, y (b) la fase de *loading*, o carga, donde aumenta la presión que ejerce el esquiador contra la nieve y se produce la conducción de la curva.

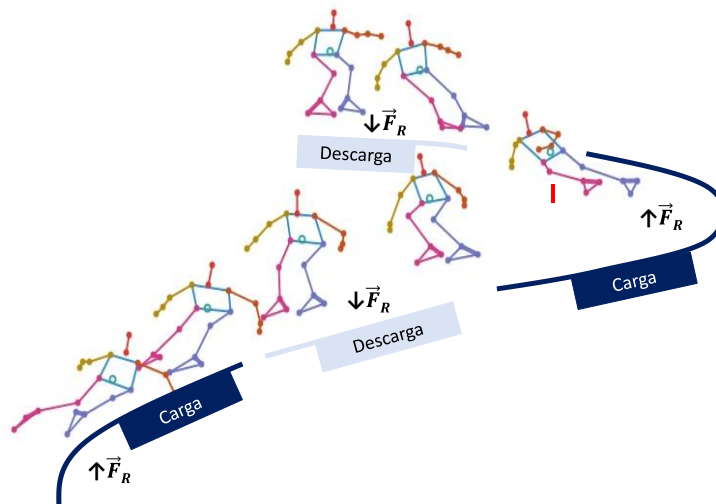


Figura 17. División de la curva de esquí según Nakazato *et al.* (2011). F_R es la fuerza de reacción de la nieve.

Por último, Vaverka *et al.* (2012) (18) analizaron la curva mediante un registro dinamométrico que les permitió medir la fuerza de reacción de la nieve. Basándose en las conclusiones de Howe (1983) (59), dividieron la curva en dos fases: (a) la fase de inicio y (b) la fase de conducción. Durante la fase de inicio, el CdM del esquiador se mueve en línea recta y, por tanto, no actúa ninguna fuerza lateral. En esta fase, la fuerza de reacción de la nieve resulta más pequeña o igual a la componente de la fuerza de la gravedad perpendicular al plano inclinado (fuerza normal). En la fase de conducción, en la que el esquiador se mueve en una trayectoria curvilínea, existen fuerzas laterales que actúan sobre el sistema esquiador-esquí e incrementan la fuerza de reacción de la nieve hasta que su magnitud es mayor que la fuerza normal.

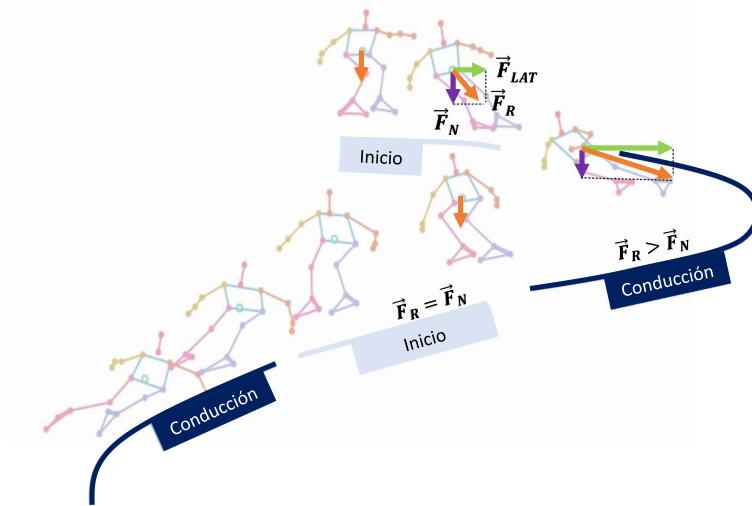


Figura 18. División de la curva de esquí según Vaverka *et al.* (2012). F_N es la fuerza normal, la componente de la fuerza de la gravedad perpendicular al plano inclinado ($mg \cdot \cos\alpha$); F_R es la fuerza de reacción de la nieve, y F_{LAT} es la fuerza lateral que actúa durante la curva.

Las fases de la curva a partir de criterios subjetivos

También hay quien ha analizado las fases de la curva bajo criterios subjetivos respaldados por una amplia experiencia en el campo. No obstante, para poder comparar diferentes esquiadores y utilizar un mismo criterio es necesario el uso de sistemas que permitan realizar un análisis objetivo. Además, las pequeñas diferencias en la estructura de la curva son imperceptibles a simple vista, por lo que es necesario un sistema de análisis del movimiento que tenga una alta exactitud y precisión.

LeMaster (2010) (50) define tres fases en una curva: (a) la fase de inicio, (b) la fase de control y (c) la fase de finalización. Durante la fase de inicio, el esquiador se inclina hacia el interior de la curva en previsión de la fuerza de reacción de la nieve que se producirá, hace el cambio de cantos, establece un ángulo de dirección inicial en relación con el nuevo esquí exterior y

1. Introducción

alinea sus segmentos corporales para que puedan resistir eficazmente la fuerza de reacción de la nieve. En la fase de control, el esquiador genera la fuerza de reacción que le hace girar. En la fase de finalización, el esquiador actúa para reducir la fuerza de reacción de la nieve disminuyendo la inclinación, reduciendo el ángulo de canteo del esquí y desplazando el equilibrio hacia la popa a lo largo del eje longitudinal de los esquís. En los esquiadores avanzados que son capaces de realizar una transición fluida, la fase de finalización se fusiona con la fase de inicio de la siguiente curva, por lo que se puede considerar una sola fase de transición, especialmente en las curvas de radio corto.

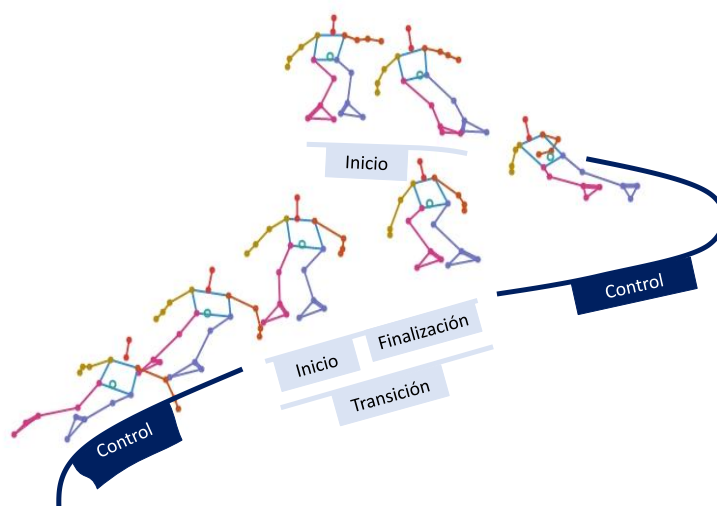


Figura 19. División de la curva de esquí según LeMaster (2010).

En resumen, esta revisión pretende mostrar las diferentes propuestas que existen hasta el momento para dividir la curva en sus fases individuales. Como se ha visto, no existe un consenso ni en el número de fases ni en su nomenclatura, y cada investigación utiliza sistemas de análisis del movimiento diferentes. No obstante, la mayoría de los estudios coinciden

1. Introducción

en una división principal en dos fases dentro de la curva¹¹: la fase de inicio, descrita como el movimiento entre curvas en el que las fuerzas laterales son inexistentes, y la fase de conducción, caracterizada por el sistema esquiador-esquí moviéndose a lo largo de una trayectoria curvilínea con una fuerza centrífuga que actúa sobre el sistema.

Cabe destacar que todas las propuestas anteriores al 1999/2000 son de antes que se introdujera el esquí *carving* (60,61). El esquí *carving* es un esquí mucho más corto que el esquí tradicional con una cintura más fuerte y una placa en la que van sujetas las fijaciones, por lo que la altura del esquiador se incrementa en 1-2 cm. El esquí *carving* tiene capacidad de deformarse y flexionarse al aplicar una fuerza sobre él y aumentar el ángulo de canteo entre el esquí y la nieve. Esto favorece las curvas talladas, aquellas en las que la fase de conducción se realiza sobre el canto del esquí sin ningún componente de deslizamiento lateral (derrapaje) (20). Este cambio en el tipo de esquí, que, sin duda, también supuso un cambio en la técnica, hace que algunos aspectos de la estructura de la curva descritos por los autores más pioneros puedan haber quedado desfasados en la actualidad.

Finalmente, en relación con los estudios que han analizado el comportamiento de la estructura de la curva de esquí y su influencia en el rendimiento, solo se han encontrado algunos autores que han observado cómo pequeñas diferencias en la estructura de la curva podrían ser decisivas para mejorar el rendimiento de la misma curva (19,35,36). Concretamente, se ha observado que las curvas más rápidas muestran una estructura similar con una fase de inicio más larga (19,35) y una fase de finalización más corta (19). Sin embargo, el rendimiento/tiempo de una sola curva no puede explicar el rendimiento/tiempo de una bajada, ya que

¹¹ Véase en todas las figuras anteriores la división de la curva en estas dos fases (color azul claro y azul fuerte).

este podría estar influenciado por el tiempo de la curva anterior e, incluso, si se comete un error al final de la curva, este podría tener una influencia marginal en la curva analizada pero afectar negativamente a la siguiente curva (30). Es por esto que, cada vez más, se utilizan parámetros que dan información sobre el rendimiento instantáneo (30,33) o se analiza el rendimiento de secciones más largas, varias curvas enlazadas (31,46,62–64). En cualquier caso, hasta donde sabemos, ningún estudio ha intentado correlacionar la estructura de la curva con el tiempo total de la bajada.

1.2.2. La influencia de la geomorfología del terreno y el trazado en la estructura de la curva de esquí

Para encontrar respuestas a preguntas relacionadas con el rendimiento, son indispensables los experimentos en condiciones reales. En el esquí alpino, la nieve, la geomorfología del terreno y el trazado son factores externos inciertos que hacen que el esquiador tenga que ir adaptando su movimiento (velocidad, trayectoria, posiciones corporales, etc.) durante el transcurso de la bajada. En un entorno tan cambiante es importante evaluar si la inclinación de la pendiente (más suave o más pronunciada) y las diferentes configuraciones del trazado (más girado o más recto) podrían influir en la estructura de la curva de esquí o si, por el contrario, se observan características similares independientemente del contexto.

Pendiente pronunciada vs. pendiente suave

Las pendientes por las que los esquiadores bajan pueden ser suaves ($0-12^\circ \approx 0-20\%$) o más pronunciadas ($17-24^\circ \approx 30-45\%$). A medida que aumenta la pendiente, la energía potencial disponible por curva es mayor (3), lo que podría afectar a la disipación de energía y, en consecuencia, a las aceleraciones y a las fuerzas. Hasta donde sabemos, solamente hay un

1. Introducción

estudio que haya investigado la influencia del factor pendiente en parámetros biomecánicos de la curva de esquí. Supej *et al.* (2015) (40), en un estudio donde compararon curvas de SL en dos pendientes diferentes [(25,2° (47 %) vs. 19,8° (36 %)], vieron que el comportamiento de las variables cinemáticas y cinéticas analizadas fueron diferentes. En la pendiente más pronunciada, la velocidad fue menor en todas las fases de la curva, las curvas fueron más bruscas (con un radio de giro más corto y con el ápice situado antes de la puerta), el pico de fuerza de reacción de la nieve se concentró en la mitad de la fase de conducción, las angulaciones laterales de las rodillas y las caderas fueron más pronunciadas al inicio de la fase de conducción, hubo una mayor disipación de energía antes de la puerta y hubo una menor disipación después de la puerta. Sin embargo, en cuanto a la estructura de la curva, no se dio ningún efecto debido a la pendiente, es decir, encontraron que la duración relativa de cada fase de la curva fue similar entre las distintas pendientes.

Trazado girado vs. recto

Cambiando la distancia entre las puertas se modifican las características que puede tener un trazado y, por ende, las trayectorias que deberán recorrer los esquiadores. Aunque existe una reglamentación establecida por la FIS (10), hay mucha libertad para decidir muchas de las características del trazado. Por ejemplo, al aumentar o disminuir la distancia horizontal entre las puertas —lo que se conoce coloquialmente como «pasillo»—, se puede hacer que un trazado sea más girado o más recto respectivamente. Spörri *et al.* (2012^a) (65) comprobaron que, al aumentar la distancia horizontal entre las puertas de un trazado de GS, disminuyó la velocidad en la fase de finalización de la curva, la fuerza centrípeta actuó durante más tiempo, duplicándose significativamente en la fase de finalización, y predominó la posición retrasada de los esquiadores (peso en las colas de los esquís) y la

1. Introducción

inclinación lateral (hacia el interior de la curva), llevándolos a adoptar posiciones más críticas que desencadenaban situaciones de desequilibrio. En cuanto a la estructura de la curva, el trazado más girado alargó la fase de conducción de la curva. No obstante, independientemente del trazado (girado vs. recto), las curvas más rápidas mostraron una estructura similar, con una fase de inicio más larga y una fase de finalización más corta. Además, en las curvas más rápidas, el mayor tiempo de la curva transcurrió antes de la puerta.

Cabe destacar que los estudios que han analizado la influencia del aumento de la distancia horizontal entre las puertas de un trazado en las variables cinemáticas y cinéticas se han realizado mayoritariamente en la prueba de GS (19,65,66). Solamente se ha encontrado un estudio realizado en la prueba de SL (6) donde también se analizó la estructura de la curva en base a dos trazados cuyas distancias entre puertas eran diferentes. Sin embargo, se modificó tanto la distancia horizontal como la distancia entre puertas, con lo que no sabemos cuál de las dos distancias tuvo más influencia en la estructura de la curva de esquí. Aunque la distancia entre puertas sea la distancia regulada por la FIS (10) y la más práctica de utilizar para los entrenadores en su día a día, es una distancia linealmente independiente de la distancia horizontal. Por lo tanto, las distancias que describen exactamente la configuración del trazado son la horizontal y la vertical, aunque también son las más complejas de determinar en la práctica (8).

Por lo que sabe la autora, no hay ningún estudio que haya considerado conjuntamente cómo afectan el factor pendiente y el factor trayectoria (entendido como la modificación en la distancia horizontal entre las puertas de un trazado) en la estructura de la curva de esquí, ni su influencia en el rendimiento.

Caracterización de la geomorfología del terreno y del trazado

La caracterización del terreno es muy importante, ya que, al no estar en un laboratorio, es necesario controlar los factores externos que pueden influir en los resultados. Para llevarla a cabo se han utilizado varios métodos topográficos, como los teodolitos, los taquímetros o los sistemas GNSS diferenciales, que permiten obtener la posición de los diferentes puntos de control repartidos por el espacio de medición y que sirven para calibrar dicho espacio (6,9,67). Una vez recogidos todos los puntos, es posible crear modelos digitales del terreno aplicando métodos de triangulación (68). En el trabajo de Reid (2010), por ejemplo, para medir la geomorfología de la superficie de un área relativamente pequeña (una curva) necesitaron medir la posición de 82 puntos con un teodolito.

Actualmente, la captura de datos topográficos mediante la fotografía de drones para la elaboración de modelos 3D y modelos digitales de elevación (MDE) se ha vuelto más accesible, y es un método más fácil y económico para la obtención de datos topográficos que los métodos tradicionales. Además, es un sistema que permite reducir el número de puntos de control que los investigadores deben medir, generar una nube de puntos mucho más densa para crear el MDE —gracias a que se identifican los puntos en común entre las imágenes tomadas por el dron—, caracterizar un área de terreno más extensa y, en definitiva, reducir el tiempo empleado tanto en el precomo en el postprocesamiento.

1.2.3. Sistemas de análisis del movimiento para caracterizar la estructura de la curva de esquí

Para caracterizar la estructura de la curva de esquí se han utilizado diferentes métodos de análisis del movimiento, que van desde los sistemas de fotogrametría a través de videograbación (19,22,32,38–40) a sistemas

1. Introducción

wearable, como los sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS) (42–45) y los sensores de fuerza (16,18,20,46,47). Desde hace relativamente poco tiempo, los dispositivos IMU se han sumado a los sistemas *wearable* para el análisis del movimiento en el esquí alpino (25,31,46,48,63,64,69,70). A continuación se presentan las principales ventajas e inconvenientes de cada uno de los métodos comentados, todos ellos se resumen en la figura 20.

Sistemas de fotogrametría a través de videograbación

Los sistemas de fotogrametría a través de videograbación han sido el método de referencia para las mediciones cinemáticas en el esquí alpino de competición debido a su exactitud y precisión (39). A partir de la estimación de la posición del CdM y la reconstrucción cinemática de esta —trayectoria y velocidad— se ha logrado la delimitación precisa de la curva de esquí y sus fases (6,14,19,24,39). En el contexto del esquí alpino, para poder detectar diferencias significativas relacionadas con la posición o la orientación 3D, la exactitud y la precisión de un sistema de medición debe ser inferior a 0,1 m (6). En la reconstrucción de la posición del esquiador a partir de sistemas de fotogrametría a través de videograbación cabe esperar errores máximos de unos 0,03 m en situación real de entrenamiento (6,39,71). Múltiples cámaras capturan y reconstruyen la realidad del movimiento mediante algoritmos que transforman las imágenes bidimensionales en el espacio 3D con la utilización de puntos de control de calibración. Se han utilizado tanto cámaras de vídeo fijas (3,14,24,30,72,73) como cámaras con movimiento libre para seguir al esquiador, en inglés, *subject-tracking cameras* (74–76). Ambos enfoques han servido para delimitar la curva y sus fases, aunque presentan algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta y se explican a continuación.

En primer lugar, la nieve conlleva una dificultad en la filmación con

1. Introducción

videocámaras en exteriores. La meteorología, las superficies irregulares y los cambios de rasante, entre otros factores, pueden dificultar la visibilidad. Además, para el análisis 3D hay que colocar varias videocámaras y tener una visibilidad sin obstáculos de los esquiadores desde al menos dos ángulos (6). Esto requiere hacer pruebas para garantizar que, en situación real de bajada, cuando el esquiador levante nieve durante la curva, la pulverización no tape los segmentos corporales o los marcadores que se quieren analizar, ya que esto provocaría lagunas en los datos (77). En relación con las cámaras, estas tienen que sincronizarse, lo que requerirá de técnicas de sincronización que tengan un error de desfase mínimo que pueda asumirse en el esquí (78). Hoy en día existen cámaras «*genlock*», que tienen la capacidad de sincronizarse automáticamente, aunque su precio es elevado.

En segundo lugar, a parte de las cámaras, se deben colocar los puntos de control que servirán para calibrar el espacio. Estos tienen que fabricarse considerando varios factores, como que cuenten con una posición sólida, que sean fácilmente digitalizables y, al mismo tiempo, que sean seguros en caso de colisión (6). Tradicionalmente se medía su posición 3D con la utilización de un teodolito (21,74–76) o con taquímetros (3,40). Actualmente existen aparatos más modernos, como los receptores GNSS de alta precisión (9). Aunque solo son necesarios un mínimo de 6 puntos de control, generalmente se recomienda la utilización de entre 12 y 20 (6,79). Adicionalmente, también es frecuente utilizar las mismas puertas del trazado como puntos de control (6,9). Un error en estas mediciones puede traducirse en errores de calibración importantes que desvirtúen los resultados finales (6). Además, una limitación a tener en cuenta es que la colocación de los puntos de control puede comprometer la comodidad y la seguridad de los participantes cuando esquían a altas velocidades por la zona de medición.

1. Introducción

En tercer lugar, otra dificultad importante es el volumen limitado de movimiento que puede capturarse para el análisis 3D. Con la utilización de entre cuatro y seis cámaras, la mayoría de los estudios han analizado una (3,14,24,39,77,80), dos (38), tres (40) y hasta un máximo de cuatro (30) curvas completas, lo que reduce la posibilidad de sacar conclusiones para el rendimiento total de la bajada.

Por último, el extenso tiempo de trabajo de digitalización una vez se han recogido los datos es una limitación que requiere de personal formado para el análisis y la comprensión de los resultados (6,14). Además, los parámetros biomecánicos obtenidos deben interpretarse con cautela, ya que se miden indirectamente a partir de la estimación de una posición en una imagen (81).

Dentro de este grupo de sistemas de medición, aunque menos utilizados en esquí, se han querido destacar los sistemas de estereofotogrametría optoelectrónicos, que son la referencia de los sistemas de captura de movimiento cuando se pretende analizar la posición o la orientación de los movimientos humanos con una precisión y exactitud inferiores a 0,001 m (26,29,77,82,83). Estos se basan en cámaras infrarrojas fijas que solo pueden adquirir datos en un área restringida, por lo que su uso es común en situaciones de laboratorio. En el esquí se han realizado varios estudios en condiciones *indoor* en tapiz (26,29,83), y solo se ha encontrado un estudio donde se haya utilizado este sistema en condiciones reales de entrenamiento en pistas (77). En dicho estudio se reportó una exactitud y precisión inferior a 0,003 m. No obstante, su uso en exteriores es muy complejo, ya que, debido a la naturaleza estática de las cámaras, se requiere un gran número de cámaras (>20) para cubrir una sola curva de esquí, lo que implica un gran tiempo de preparación y la contratación de personal técnico cualificado. Además, estas cámaras son muy sensibles a la luz y a las bajas

temperaturas, por lo que requieren de sistemas de protección de calefacción personalizados.

Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)

La tecnología GNSS comenzó a aplicarse en el ámbito militar y, posteriormente, ha tenido una gran transferencia a muchos otros campos de aplicación, entre ellos, el deporte (84–89) y, concretamente, el esquí alpino (7,8,42,53,62,90–92).

Los sistemas GNSS se componen de tres sectores: el sector espacial, configurado por los satélites que están en órbita en la exosfera y que mandan señales electromagnéticas a la tierra; el sector de control, conformado por estaciones que tienen coordenadas muy precisas y consiguen mantener el contacto continuo con los satélites para controlar su funcionamiento, y el sector usuario, configurado por receptores GNSS con sus respectivas antenas, que pueden estar integrados en cualquier dispositivo *wearable*, como, por ejemplo, un teléfono móvil. Este sistema permite captar la señal de las ondas electromagnéticas de los satélites en órbita que haya visibles en ese momento y calcular la distancia a dichos satélites multiplicando el tiempo que ha tardado la señal en viajar por la velocidad de la luz. Mediante el cálculo de la distancia de, al menos, cuatro satélites, es posible definir la posición 3D (longitud, latitud y altitud) del deportista llevador de esa antena (85). A partir de aquí se puede estimar la posición del CdM mediante modelos de aproximación (93–95) y calcular todas las variables cinemáticas (trayectoria, radio de curva y velocidad) (7,8,42,53,62,90–92), incluidos el momento de cambio de curva (42–44) y las fases de la curva (44).

Cabe destacar que, en los últimos años, la combinación de sistemas GNSS con dispositivos inerciales ha hecho mucho más preciso y sencillo el cálculo

para la estimación del CdM (42,90). Por otro lado, estos sistemas también han demostrado su validez para estimar parámetros cinéticos como las fuerzas de reacción de la nieve y las fuerzas de fricción con el aire y con la nieve (44,96).

Se puede establecer una clasificación de los sistemas GNSS en función de tres parámetros:

(a) Si son capaces de recibir señales emitidas desde varios sistemas de satélites a la vez. Por ejemplo, los sistemas GNSS que reciben señales tanto del sistema ruso (GLONASS) como americano (GPS) (96,97). Estos han demostrado una mayor precisión, ya que aumentan las posibilidades de que haya, al menos, cuatro satélites visibles (94–96).

(b) Si utilizan una sola frecuencia (L1) (31,97) o múltiples frecuencias (L1+L2) (90,97). Los receptores GNSS de gama alta (GNSS *high-end receivers*) suelen utilizar ambas frecuencias (L1+L2), mientras que los de gama baja (GNSS *low-end receivers*) suelen utilizar solo L1 (98). Se ha observado que la utilización de ambas frecuencias ayuda a corregir las perturbaciones cuando la señal electromagnética se propaga por la ionosfera (99).

(c) Si utilizan un método de procesamiento diferencial (dGNSS) (85,90,94,97,100–102) o no (ndGNSS) (88,97). Los dGNSS aumentan su precisión reduciendo los errores sistemáticos. Para realizar una medición diferencial se necesitan al menos dos receptores GNSS con sus respectivas antenas. Una unidad se monta en el atleta que estará en movimiento (*rover*), y la otra estará fija/inmóvil (*estación base*) en un radio de pocos kilómetros. El receptor base calcula su distancia a un conjunto de satélites; la diferencia entre la posición calculada y la localización exacta del receptor constituye el error en la medida. Este error se transmite en un código

1. Introducción

predefinido y cualquier usuario receptor (*rover*) con capacidad de corrección diferencial puede acceder a él para corregir su posición.

Debido a las características del esquí alpino, los sistemas GNSS que proporcionan mayor exactitud y precisión (por debajo de los 0,1 m) son los que combinan los sistemas de satélites GPS y GLONASS, utilizan doble frecuencia (L1+L2), emplean un método de procesamiento diferencial y tienen una frecuencia de muestreo de mínimo 50 Hz (97). Sin embargo, a pesar de su validez, este sistema también implica una serie de limitaciones. En primer lugar, el esquiador debe llevar una pequeña mochila con un receptor y una antena colocada en el casco (45), lo que puede influir en el confort y la técnica del esquiador (31,102). Dicha antena también puede ir detrás del cuello (90) o en la pelvis (103), aunque en estos sitios puede disminuir la visibilidad de los satélites. En segundo lugar, es necesaria una línea de visión directa entre los satélites y la antena para garantizar la correcta recepción de las señales, ya que la precisión del posicionamiento depende del número de señales recibidas y de la distribución espacial de los satélites en el cielo. Esta limitación es importante, puesto que la visibilidad de los satélites se puede ver afectada por varios motivos. Uno de ellos es el cambio constante de la constelación de los satélites durante el día. Para garantizar el mayor número de satélites es vital planificar el tiempo de toma de medidas en función de la disponibilidad de los satélites (104). Otro motivo es el propio movimiento del esquí, ya que el esquiador, al inclinarse en varias direcciones en cada curva, hace que vaya cambiando el ángulo de recepción de las señales e, incluso, podría ocultar la antena que recibe las señales de los satélites detrás de alguna parte del cuerpo. Otro motivo por el cual disminuye la visibilidad de los satélites son las obstrucciones propias del terreno alpino, como las pendientes (45). Se ha visto que, a mayores ángulos de inclinación del terreno, mayor es la dilución de precisión de posición (PDOP). Este es un parámetro que indica la magnitud del error que

1. Introducción

se está cometiendo en la precisión de la posición, donde una buena geometría satélite-usuario corresponde a un PDOP inferior a 6 (105), siendo excelente si es inferior a 2 (101). Para ángulos de inclinación de 40° se han visto PDOP de 7,8 (97).

A causa de estas limitaciones, que afectan a la precisión de la posición, es lógico que la mayoría de los estudios que se han realizado con sistemas de medición GNSS se hayan llevado a cabo en las pruebas de GS (7,8,42,53,92), SG (7) y DH (7,91), donde el radio de la curva es, de media, 22,7 m, 52 m y 61,6 m, respectivamente (7). En cambio, en la prueba de SL apenas existen estudios donde se mida la cinemática del esquiador con sistemas GNSS, seguramente porque, al ser los radios más pequeños, el error podría no ser asumible en muchos casos (90).

Sensores de fuerza

Los sensores de fuerza miden las fuerzas de reacción de la nieve. Estas fuerzas dan información de la interacción entre el esquiador y los esquís, y han sido utilizadas para delimitar las fases de la curva (16,18,20,46,47). Entre los sensores para medir la fuerza de reacción de la nieve destacan las plataformas de fuerza portátiles, las galgas extensiométricas y las plantillas de presión.

Las plataformas de fuerza portátiles son consideradas el sistema de referencia para medir las fuerzas de reacción de la nieve en el esquí alpino (27,58,81,106–108). Se colocan entre el esquí y el complejo de la fijación, ya que, cuanto más cerca están de la nieve, más real es el valor que recogen (27,58,81). No obstante, en esta posición pueden afectar a la técnica y a la comodidad del esquiador debido al peso añadido en el complejo de las fijaciones de los esquís (27,106). Por este motivo, y por seguridad, no se recomienda su uso en competiciones ni situaciones semejantes a la

1. Introducción

competición (81,106). Una nueva propuesta que se desarrolló en 2006 y se diseñó para ayudar a los entrenadores y deportistas del equipo nacional alemán de esquí alpino, fue colocar unas galgas extensométricas entre la bota y el complejo de la fijación (54) de una manera semejante al sistema que utilizó Müller en 1994 (16). Estos sensores de fuerza se optimizaron en cuanto a peso, estructura y manejo, facilitando la adaptación a una gran variedad de fijaciones y botas, haciendo posible que los esquiadores utilizaran sus propios esquís.

Junto a las plataformas de fuerza y las galgas extensiométricas, las plantillas de presión son uno de los sistemas más utilizados para medir las fuerzas de reacción de la nieve en el esquí alpino (18,46,58,63,81,106). No obstante, las plantillas se colocan dentro de la bota y son menos invasivas que las plataformas de fuerza y las galgas extensiométricas (58). En este sentido, la gran ventaja de la plantilla es que es un sistema que puede aplicarse en las carreras utilizando el propio material del deportista. Sin embargo, cabe destacar que, para aquellos esquiadores que utilicen botas con forro termomoldeado —que se adaptan con precisión al pie para un mejor control del esquí—, la colocación de la plantilla puede ser un hándicap, ya que podría restar este efecto (46). La mayor limitación de las plantillas de presión es que, debido a su colocación, solo pueden medir la presión entre la superficie plantar del pie y la bota, y no la fuerza real transmitida por el esquiador a los esquís, que en gran parte se transmite a través de la caña de la bota (27,81,106,109), por lo que su validez es limitada y no siempre indica con precisión la magnitud de la fuerza de reacción al suelo (27,58,106).

Además, una de las principales limitaciones de los sensores de fuerza es que no permiten la detección del paso por la puerta, y, por lo tanto, no es posible estudiar la curva en relación con el trazado (6,19,22).

Los dispositivos IMU

En los últimos años, los dispositivos IMU, han demostrado su capacidad para mejorar la información obtenida del movimiento deportivo y el análisis del rendimiento en varios deportes (110).

Estos dispositivos de microtecnología integran multitud de microsensores; entre ellos, un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro. También pueden incorporar un barómetro y, actualmente, hasta un receptor y una antena GNSS. Estos diferentes sensores pueden medir de uno a tres ejes de movimiento y están sincronizados bajo la misma escala temporal, aunque cada uno registra a diferentes frecuencias de muestreo. Así, el GNSS incorporado en estos dispositivos funciona en torno a 10 o 15 Hz (111–113), mientras que otros sensores, como el acelerómetro, registran a un mínimo de 100 Hz en la mayoría de dispositivos del mercado (114,115), llegando a una frecuencia de muestreo de 1000 Hz en el caso del WIMU (Realtracksystem, Almería, España), que es el que se ha usado en esta tesis doctoral para el registro de datos de la estructura de la curva de esquí. Esta mayor frecuencia de muestreo del acelerómetro con respecto al GNSS nos aportará datos más precisos para entender y explicar el rendimiento; especialmente, cuando queremos fijarnos en los pequeños detalles que marcan la diferencia (114,116,117).

Algunas de las principales ventajas de los IMU son las siguientes: (a) son pequeños, ligeros y poco invasivos; (b) son fáciles de transportar y de colocar; (c) funcionan de forma inalámbrica; (d) tienen capacidad para registrar un gran número de datos, y (e) fusionan varios microsensores, optimizando el tiempo empleado en el preprocesamiento, la recogida de datos y el postprocesamiento (118).

En el ámbito del esquí alpino, los dispositivos IMU se han sumado a los

1. Introducción

sistemas *wearable* de monitorización (29,31,46,63,64,69,70,119). Su aplicación surgió primeramente como complemento a otros sistemas de captura del movimiento (31,42) y ha ido ganando importancia debido a su gran abanico de posibilidades y a la practicidad que ofrecen en el entrenamiento en las pistas de esquí (69). Cuando se empezaron a utilizar, la deriva asociada a la recopilación de datos cinemáticos corporales en 3D llevó a la comunidad científica a cuestionar la validez de sus mediciones (69). No obstante, recientemente, los fabricantes de sensores han empezado a emplear diversos tipos de filtrado y algoritmos de fusión para minimizar o eliminar la deriva (29,69,120,121). Además, una de las razones por las que los dispositivos IMU se están empleando cada vez más para medir movimientos deportivos es que los errores asociados a las mediciones de laboratorio de las rotaciones y los ángulos de abducción y aducción mediante estereofotogrametría (122) parecen ser de la misma magnitud que los obtenidos con los dispositivos inerciales (123).

En un inicio, la tendencia fue poner muchos dispositivos repartidos por el cuerpo con la ayuda de trajes inerciales para estudiar la posición del CdM y de los diferentes segmentos corporales (42,124), pero, actualmente, los estudios de investigación intentan usar metodologías menos invasivas, reduciendo el número de dispositivos colocados encima del esquiador. Estas metodologías son poco llamativas para el deportista y evitan posibles alteraciones de los datos relacionados con la comodidad o las modificaciones de la técnica (28,29,42,46,48).

Hasta la fecha, la aplicación de los dispositivos IMU en el esquí ha servido para para estimar las posiciones de los segmentos corporales con una exactitud inferior a 0,11 m y una precisión inferior a 0,03 m. De la misma manera, también se han usado para estimar la posición del CdM con una exactitud y precisión inferior a 0,03 m y 0,007 m, respectivamente (83).

1. Introducción

Asimismo, se han usado para calcular los ángulos articulares y la orientación en 3D de la rodilla, la cadera y el tronco en los movimientos de flexión, abducción y rotación, y han demostrado su validez para la comparación *intra* sujeto (120,125). En esta línea, también se han usado para determinar las diferencias entre diferentes técnicas de esquí, como el cruce por arriba y el cruce por abajo, con base en la medición de la aceleración 3D y la velocidad angular 3D medida a nivel de los muslos y las botas (57).

Por otro lado, con la colocación adecuada de imanes potentes, los dispositivos IMU que lleven incorporado un sensor magnetómetro también pueden determinar el momento del paso por las diferentes puertas de un trazado y calcular el tiempo transcurrido entre dos secciones cualesquiera del trazado, como, por ejemplo, los tiempos entre puertas (126,127), lo que permite un análisis mucho más detallado del rendimiento en el trazado (véase el capítulo 8).

En relación con la estructura de la curva de esquí, se ha demostrado que el punto TS puede detectarse con el uso de un solo dispositivo IMU a través de la inclinación de la pelvis (46) o de datos basados en la aceleración lateral del tronco (48) o la velocidad angular de la bota (25). Estas dos últimas metodologías han sido consideradas de las más exactas y precisas (26). No obstante, hasta donde sabemos, ningún estudio ha explorado las fases de la curva con el acelerómetro de un dispositivo IMU.

Además de todos los parámetros mencionados, los dispositivos IMU también se han utilizado para controlar las vibraciones de todo el cuerpo, en inglés, *whole-body vibration* (WBV), y la transmisibilidad de las vibraciones producidas durante el esquí a diferentes partes del cuerpo (128–132). Gracias a estos estudios se ha visto que todos los tipos de esquí producen WBV y, aunque la mayoría de las vibraciones son absorbidas por

1. Introducción

las piernas, sobre todo las frecuencias de entre 8 y 12 Hz (128), las vibraciones de frecuencias más bajas, es decir, de entre 4 y 10 Hz, podrían ser especialmente propensas a causar lesiones en la espalda en relación con la práctica del esquí alpino (129,131).

En referencia a los parámetros de la mano de la cinética, a partir de la colocación apropiada de los dispositivos IMU se puede estimar la fuerza de reacción contra el suelo (131). No obstante, puede existir un sesgo, ya que se asume que la pelvis es el CdM y que la resistencia del aire es insignificante. Por otro lado, con la colocación de los dispositivos IMU en zonas específicas del esquiador, por ejemplo, en la parte trasera de la bota, se ha podido estimar la fuerza radial (133). Esta es la fuerza que actúa en perpendicular a la dirección tangencial de la trayectoria del esquí y que depende de la velocidad y del radio de la curva (134,135). En general se ha observado que los mejores tiempos están asociados a una mayor fuerza radial y que los atletas que posean una elevada capacidad de generar fuerza radial podrían ser capaces de hacer la curva más cerrada a una velocidad determinada o hacer la curva a una mayor velocidad con un radio de giro determinado sin necesidad de disipar energía adicional (13,134).

En cuanto a las fuerzas de rozamiento del aire y de la nieve, es decir, las fuerzas responsables de la disipación de energía en el esquí alpino (3), sabemos que no pueden ser determinadas por los dispositivos IMU por si solos. Sin embargo, los IMU pueden ser un complemento en combinación con otros sistemas que ya se utilizan, como los sistemas de videograbación (3,80,136,137) o los sistemas GNSS (53,91). No obstante, recientemente se ha apuntado que el sensor barométrico incorporado en el dispositivo IMU podría utilizarse para estimar la resistencia total del aire (121).

A continuación se comentan algunas de las limitaciones de la utilización de los dispositivos IMU.

1. Introducción

En primer lugar, es importante seguir las recomendaciones de los fabricantes para la correcta colocación del dispositivo. Cuando se utilizan trajes inerciales para capturar el movimiento de todo el cuerpo, deben seguirse las indicaciones de posicionamiento para controlar los movimientos relativos de los segmentos corporales de interés (1,31). Dependiendo de los parámetros que se quieran investigar, la colocación de los dispositivos o del dispositivo IMU —en caso de que solo se utilice uno— puede cambiar (46,64,131). Al mismo tiempo se deben minimizar los errores debidos al movimiento de los dispositivos, por ejemplo, como consecuencia de las contracciones musculares (31,46,83). En esta línea, también es importante asegurarse de que el dispositivo se fije a los segmentos del cuerpo con la mayor firmeza posible, minimizando la interferencia con el movimiento y rendimiento deportivo. En el ámbito del esquí alpino, por ejemplo, es difícil proteger los dispositivos colocados en los brazos o en la parte delantera de la bota de los impactos con las puertas (69). Por otro lado, es importante comprobar antes de cada bajada que los dispositivos no se han desplazado respecto a la primera colocación.

Otro aspecto a tener en cuenta es la correcta calibración de los dispositivos siguiendo las recomendaciones de cada fabricante. En todo caso será de gran utilidad construir una plataforma nivelada en la salida para asegurar una calibración adecuada o buscar un lugar nivelado, medido previamente, para realizar las calibraciones (69).

Cabe destacar que, cuando se utilizan los trajes inerciales para capturar el movimiento de todo el cuerpo, solo se puede monitorizar a un esquiador a la vez. Por eso, la tendencia es a reducir el número de dispositivos y a medir a cada deportista con un único dispositivo, de manera que se puedan registrar múltiples esquiadores a la vez y múltiples bajadas. Por otro lado, es importante asegurarse en cada bajada de que los dispositivos no se han

desplazado respecto a la primera colocación.

Por último, tal y como se ha comentado, estos dispositivos se caracterizan por la fusión de sensores. Esto facilita la interpretación de muchos de los datos. Por ejemplo, cuando analizamos una bajada de un esquiador, vemos que el barómetro ha registrado una disminución de la altitud, lo que nos indica que el esquiador estaba descendiendo. Del mismo modo, si colocamos unos imanes en las puertas, el sensor magnetómetro registra un aumento en el campo magnético en el momento en que el esquiador pasa por una puerta determinada del trazado. Aun así, se recomienda la sincronización con vídeo para disponer de un apoyo visual adicional a los datos.

Este avance en la tecnología y en las herramientas de medición y captura del movimiento nos permite, por lo tanto, ir un paso más allá en la evaluación del entrenamiento en las pistas de esquí. En esta tesis se ha optado por un sistema lo más sencillo posible: un dispositivo IMU colocado en la zona baja de la espalda de los esquiadores. Uno de los retos de esta tesis doctoral ha sido poder utilizar estos dispositivos de medición para evaluar la estructura de la curva y su relación con el rendimiento deportivo.

1. Introducción

Sistemas de fotogrametría a través de vídeo-grabación	Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)	Sensores de fuerza		Dispositivos IMU
		Plataformas de fuerza y galgas	Plantillas de presión	
<p>Exactitud y precisión (sistema de referencia).</p> <p>No invasivo</p> <p>Detección del paso por las puertas</p>	<p>Captura de bajadas enteras</p> <p>Detección del paso por las puertas</p>	<p>Exactitud y precisión (sistema de referencia).</p> <p>Captura de bajadas enteras</p>	<p>No invasivo</p> <p>Captura de bajadas enteras</p>	<p>Exactitud y precisión</p> <p>No invasivo</p> <p>Captura de bajadas enteras</p> <p>Detección del paso por las puertas</p>
<p>Dificultad de medición en el entorno natural.</p> <p>Tiempo de preparación (sincronización cámaras, puntos de control, calibración, etc.)</p> <p>Captura de 1-4 curvas</p> <p>Tiempo post-procesamiento</p>	<p>Invasivo (mochila + antena en el casco)</p> <p>Visibilidad y número de satélites que influyen en la exactitud y precisión.</p>	<p>Invasivo</p> <p>No detectan el paso por las puertas.</p>	<p>Exactitud y precisión</p> <p>No detectan el paso por las puertas.</p>	<p>Dispositivo bien fijado al cuerpo</p> <p>Dificultad en la selección de los parámetros que se quieren medir.</p>

Figura 20. Ventajas (verde) e inconvenientes (naranja) de los diferentes sistemas de análisis del movimiento.

2. Objetivos de la tesis

La presente tesis pretende desarrollar procedimientos que faciliten a los entrenadores analizar parámetros biomecánicos, objetivos y cuantificables que puedan influir en el rendimiento de los esquiadores alpinos cuando realizan bajadas por un trazado mediante la utilización de un dispositivo IMU.

Objetivos principales

Los objetivos principales de esta tesis son:

- 1) Desarrollar y evaluar la validez de un sistema de cronometraje basado en imanes (M-BTS) para cronometrar acciones deportivas de corta duración utilizando el magnetómetro de un dispositivo IMU.
- 2) Evaluar la influencia de la estructura de la curva de esquí en el rendimiento de los esquiadores alpinos al bajar por diferentes trazados de SL a través del acelerómetro de un dispositivo IMU y del M-BTS.

3. Métodos

Para abordar los objetivos propuestos en la presente tesis se realizaron dos estudios: un estudio de validación (estudio 1), que cumplió con el primer objetivo, y un segundo estudio (estudio 2), que afrontó el segundo objetivo.

Previamente a los estudios 1 y 2 se realizaron una serie de ensayos previos que fueron fundamentales para la consecución de los objetivos principales.


En este capítulo se presenta un resumen de los métodos conjuntos utilizados en los diferentes estudios y ensayos. Concretamente, en la figura 21 se detallan de forma esquemática los objetivos, la muestra, las variables analizadas, el material y la estadística utilizada.

Adicionalmente, se han querido detallar las características de los dispositivos IMU utilizados (figura 22).

En el siguiente capítulo (*Estudios*) se presentan copias de las publicaciones que constituyen el cuerpo principal de esta tesis. Los manuscritos se presentan en su orden cronológico siguiendo los objetivos principales propuestos. Los diseños metodológicos específicos se encuentran detallados en el apartado de materiales y métodos de cada manuscrito. Asimismo, también se presentan en detalle los ensayos realizados con la metodología utilizada, los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas.

Esquema Tesis					
	Ensayo previo	Estudio 1	Ensayo previo	Ensayo previo	Estudio 2
Objetivo	Diseñar una barra magnética para el M-BTS	Evaluar la validez del M-BTS para cronometrar acciones deportivas de corta duración	Analizar la viabilidad de diferentes sensores del IMU para delimitar la curva de esquí	Evaluar la validez del IMU para medir la altitud y el desnivel de un trazado de SL	Evaluar la influencia de la estructura de la curva de esquí en el rendimiento de los esquiadores al bajar por diferentes trazados de SL
Muestra	1 esquiador experto, 2 de competición U21, 1 de competición máster, 1 patinadora	- 48 atletas experimentados de nivel recreacional - 8 esquiadores de competición U18 y U21	5 esquiadores alpinos de élite de máximo nivel nacional andorrano U21 y U30	1 esquiador de competición máster	5 esquiadores alpinos de élite de máximo nivel nacional andorrano U21 y U30
VARIABLES analizadas	Fases 1-3: magnitud flujo magnético (gauss) Fase 4: tiempo secciones y total (s)	Test de carrera y trazado de SL: tiempo secciones (s); tiempo total (s)	Momento del cambio de curva	- Altitud (m) - Desnivel (m)	- Tiempos parciales (s): tiempo INI, tiempo STE _{IN} , tiempo STE _{OUT} y tiempo STE _{IN+OUT} - Tiempo total de la bajada (s)
Material	M-BTS: Barras magnéticas + Magnetómetro IMU				
	Fotocélulas inalámbricas de haz simple		Giroscopio y Acelerómetro IMU	dGNSS <i>high-end</i> ; GNSS <i>low-end</i> y barómetro IMU	Acelerómetro IMU
Estadística	Fases 1-3: análisis visual Fase 4: Bland–Altman y regresión lineal	- Rango de error del 95% - Bland–Altman - Regresión lineal	Análisis visual	U Mann-Whitney	- Coeficiente de correlación de Pearson - Gráfico de dispersión - Modelo lineal mixto

Figura 21. Esquema sobre la metodología empleada en los dos estudios y en los ensayos de la tesis.



WIMU PRO			
Sensores	Características	Variables	
Inerciales	4 x 3D Acelerómetro*	16 G a 1000 Hz	Aceleración en los 3 ejes de movimiento 8 (G); Aceleración total (G)
		16 G a 1000 Hz	
		32 G a 1000 Hz	
		400 G a 1000 Hz	
	3 x 3D Giroscopio	$\pm 500 \text{ }^\circ/\text{s}$ a 1000 Hz	Velocidad angular en los 3 ejes de movimiento ($^\circ/\text{s}$)
		$\pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$ a 1000 Hz	
$\pm 4000 \text{ }^\circ/\text{s}$ a 1000 Hz			
Seguimiento	GNSS	GLONASS + GPS (L1) a 10 Hz	Posición 2D: latitud, longitud ($^\circ$); Altitud (m); Distancia 2D (m); Velocidad (km/h); Núm. de Satélites visibles
	UWB	Indoor a 20 Hz	
Otros	3D Magnetómetro	± 8 Gauss a 100 Hz**	Flujo magnético en los 3 ejes de movimiento 8 (gauss)
	Barómetro	± 1200 mbar a 100 Hz	Altitud (m)

Figura 22. Características y variables de medición de los microsensores incorporados en el dispositivo IMU (WIMU, Realtrack Systems, Almería, España) utilizado en esta tesis. * El acelerómetro triaxial funciona con un sensor de capacitancia. Este presenta opciones de medir la aceleración con o sin gravedad, y de tomar como sistema de referencia el propio IMU o la tierra. ** Actualmente, la frecuencia del magnetómetro se ha ampliado a 160 Hz.

4. Estudios

En este capítulo se presentan los estudios realizados en versión original:

- I) Estudio 1: *Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU*
- II) Estudio 2: *Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings*

Adicionalmente, antes de cada publicación se explican, de manera detallada, los ensayos previos que fue necesario realizar para desarrollar cada uno de los estudios.

4.1. Estudio 1: *Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU*

4.1.1. Ensayo previo

Previamente a la realización del estudio 1 «*Validity of a Magnet-Based Timing System using the Magnetometer Built into an IMU*», se realizó un ensayo con el fin de diseñar una barra magnética y comprobar si el campo magnético inducido era suficiente como para ser detectado a través del magnetómetro del IMU en situación de entrenamiento en las pistas de esquí por un trazado de SL.

Diseño de una barra magnética para detectar el campo magnético inducido a través del magnetómetro del IMU

Este ensayo precede al estudio 1 de esta tesis: «*Validity of a Magnet-Based Timing System using the Magnetometer Built into an IMU*». Para realizar el estudio fue necesario el diseño de una barra magnética y la realización de pruebas para comprobar si el campo magnético inducido era suficiente como para ser detectado a través del magnetómetro del IMU en situación de entrenamiento en las pistas de esquí por un trazado de SL.

Introducción

Cuando se analizaron los primeros datos registrados por un dispositivo IMU, correspondientes a las sesiones de entrenamiento en pista de los esquiadores, se hizo evidente la necesidad de cortar las señales de los diferentes sensores del IMU pertenecientes a los descensos según los mismos criterios objetivos para todos los deportistas. Es decir, si se quería analizar una sección específica del trazado que incluía diez puertas, y se quería analizar esta sección para todos los esquiadores, hacía falta una metodología que permitiera obtener la misma sección para todos y, además, con una alta exactitud y precisión, ya que, en el esquí alpino, las diferencias entre esquiadores son de centésimas de segundo.

Además, conocer el momento de paso por las diferentes puertas de un trazado nos permitiría dividir la curva en dos fases: una fase prepuerta y una fase postpuerta (22) y, de esta manera, estudiar la estructura de la curva en función del trazado (6,19,22). A diferencia de los estudios realizados con videograbación, donde la puerta es visualmente reconocible, con los dispositivos IMU no se tiene ninguna referencia visual que permita la detección de la puerta. En su estudio, Fasel *et al.* (2019) (126) utilizaron un sistema de cronometraje basado en imanes y el magnetómetro de un

dispositivo IMU. Este sistema, denominado *magnet-based timing system* (M-BTS), permitía detectar el momento del paso por las puertas del trazado y consistía en enterrar unos imanes cerca de las puertas y colocar un dispositivo IMU en la zona baja de la espalda de los esquiadores. Cuando los esquiadores pasaban cerca de las puertas, es decir, cerca de los imanes, se detectaba un aumento en el campo magnético que quedaba registrado en el magnetómetro. Además, al pasar a grandes velocidades, el registro del campo magnético tenía forma de pico, con lo que era una referencia visual muy clara que permitía el postprocesamiento automático de la señal.

Con esta idea en mente el objetivo de este ensayo fue construir una barra magnética siguiendo las indicaciones descritas por Fasel (126) y comprobar si el campo magnético inducido era suficiente como para ser detectado a través del magnetómetro del IMU en situación de entrenamiento en las pistas de esquí por un trazado de SL. Debemos resaltar que el magnetómetro que utilizaron Fasel *et al.* (126) tenía una frecuencia de muestreo de 166,7 Hz. En cambio, el magnetómetro del IMU utilizado en la presente tesis era de 100 Hz, lo que limitaba la resolución temporal del sistema a 0,01 s. Por este motivo, una vez seleccionada la barra magnética a utilizar, se realizó una prueba donde se comparó el sistema M-BTS propuesto con fotocélulas para evaluar su validez. Este fue el precedente al primer estudio de la tesis.

Visión general del ensayo

Este ensayo consta de tres fases diferenciadas por la utilización de diferentes barras magnéticas y una cuarta fase donde se hizo una primera valoración de la validez del sistema M-BTS (figura 23). Siguiendo las indicaciones de Fasel *et al.* (126), y con la colaboración de la empresa especializada en imanes A. C. Magnets 98, de Barcelona, se construyó una primera barra magnética (fase 1) que fue modificada en las fases posteriores (fases 2 y 3) para inducir un campo magnético lo suficientemente grande

como para ser detectado en situación real de entrenamiento.

En la fase 1 se realizaron mediciones en situación de descenso directo con esquís, y en las fases 2 y 3 se realizaron mediciones en situación real de entrenamiento mientras los esquiadores bajaban por diferentes trazados de SL. En la fase 4 se realizaron mediciones fuera de la nieve simulando un trazado de SL pero con el deslizamiento de patines en línea.

En todas las fases de este ensayo se utilizó un magnetómetro 3D que registraba a 100 Hz y estaba incorporado en un dispositivo IMU (WIMU, Realtrack Systems, Almería, España). El dispositivo se calibró antes de empezar a registrar según las especificaciones del fabricante. Para realizar las mediciones, el dispositivo IMU se fijó en zona baja de la espalda de los participantes, entre L4-L5, mediante un cinturón deportivo ajustable. Se obtuvo el consentimiento informado por escrito de todos los participantes. Todos los procedimientos fueron aprobados por el Comité Ético de Investigación Clínica del Deporte de Cataluña (número de estudio 27/CEICGC/2020) y se realizaron de acuerdo con la Declaración de Helsinki. Durante la recolección de datos se grabó con una cámara portátil Full HD (Panasonic HC-V700) a 30 Hz, que se sincronizó con los dispositivos IMU para tener un soporte visual adicional en el postprocesamiento. Los datos se analizaron *a posteriori*.

Se esperaba encontrar un aumento en el flujo magnético claramente diferenciado en la señal del magnetómetro que indicara el momento en que los participantes habían pasado más cerca de la barra magnética. Además, al pasar a una cierta velocidad, se esperaba que este flujo magnético apareciera en forma de pico en la serie temporal del magnetómetro. Se utilizó el *software* SPRO (Realtrack Systems, Almería, España) para descargar los datos almacenados en el dispositivo IMU, y se graficó la señal cruda del magnetómetro con el programa Microsoft Excel.

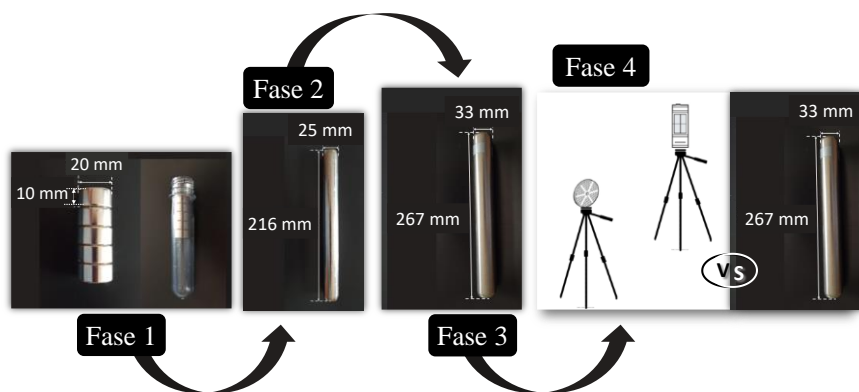


Figura 23. Diferentes barras magnéticas utilizadas en las diferentes fases de este ensayo.

Fase 1: Material y métodos

En esta fase, los participantes fueron los propios miembros del grupo de investigación.

Se construyó una barra magnética a partir de cinco imanes de neodimio de 20 mm de diámetro y 10 mm de altura (D20 mm x 10 mm, ND35, A. C. Magnets 98, Barcelona, España) (figura 23, fase 1).

Se tomaron los datos en las pistas de esquí en una situación de descenso directo de los esquiadores. Se hizo un pequeño agujero en la nieve, donde la barra magnética se introdujo verticalmente de manera que quedó enterrada con su polo norte magnético ligeramente por debajo de la superficie de la nieve. Antes de esto se colocó la barra magnética dentro un tubo de plástico (figura 23, fase 1) para evitar que los discos se separaran (126). Para tener una referencia visual de donde estaba la barra magnética, se clavó justo al lado un palo de balizamiento. Los participantes, con el dispositivo IMU colocado en la zona baja de la espalda, realizaron un total de cinco bajadas en descenso directo, es decir, en línea recta, dejando los esquís planos sobre la nieve y pasando por el lado de la barra magnética. A

cada bajada se aumentó la distancia de separación a la que se pasaba con respecto a la barra magnética. Se empezó a una distancia de 0,20 m y esta fue aumentando en 0,20 m progresivamente hasta llegar a una distancia de separación de 1 m (figura 24).

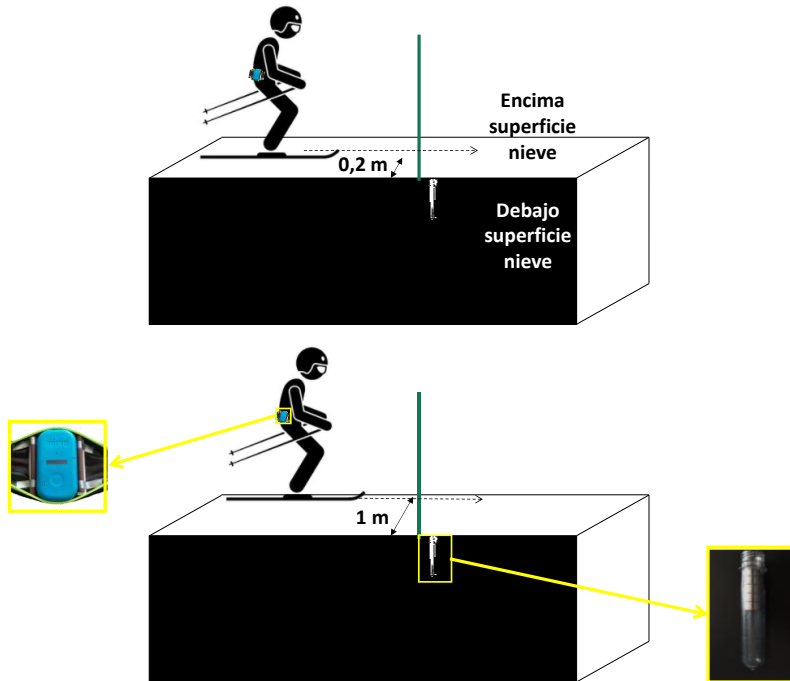


Figura 24. Ilustración de un esquiador en descenso directo con el dispositivo IMU colocado en la zona baja de la espalda.

Fase 1: Resultados

Al analizar los registros no se detectó visualmente ningún aumento en el flujo magnético en la señal del magnetómetro en ninguno de sus ejes que pudiera indicar el momento en que el esquiador estaba pasando justo por el lado de la barra magnética para ninguna de las distancias de separación seleccionadas. En la figura 25 se muestran los gráficos correspondientes a los registros del magnetómetro.

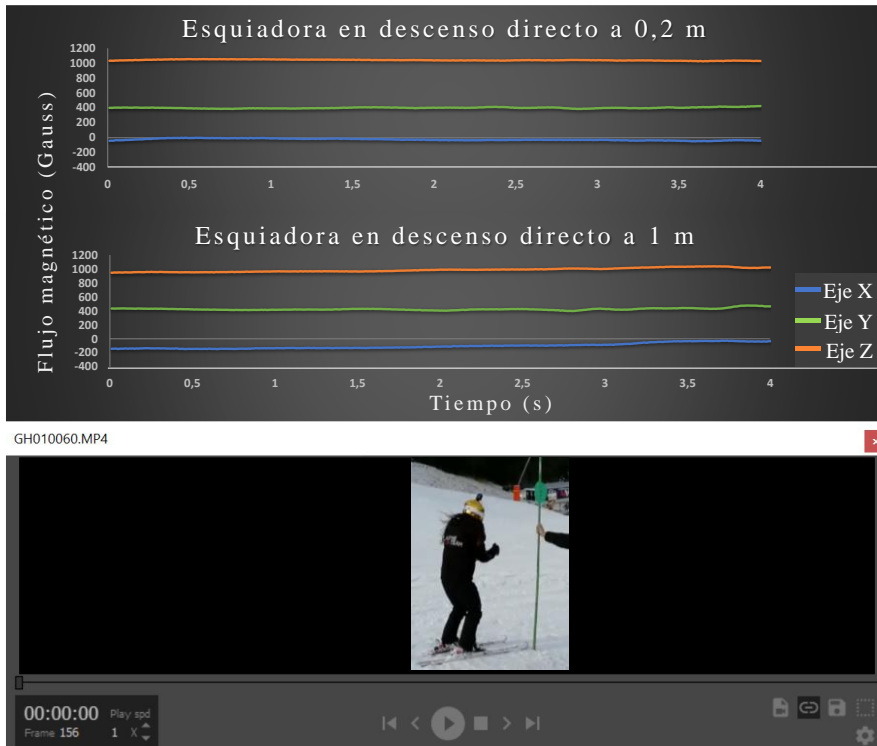


Figura 25. Registros del magnetómetro cuando el esquiador pasó a 0,2 m y a 1 m de distancia con respecto a la barra magnética. Se representa el flujo magnético de los tres ejes del magnetómetro. El eje x es el vertical, el eje y es el lateral y el eje z es el anteroposterior. La señal seleccionada corresponde al momento del descenso directo (entre 3 y 4 s) detectado a través de la sincronización con el vídeo.

Fase 1: Discusión y conclusiones

Contrariamente a lo que se esperaba, no se detectó ningún pico en la señal del magnetómetro para la condición de descenso directo en esquí, incluso en la situación de mínima distancia de separación. Cabe destacar que la distancia de separación toma de referencia los esquís y, por tanto, hay que sumar la distancia vertical respecto al suelo en la que está colocado el dispositivo IMU.

A diferencia del estudio realizado por Fasel *et al.* (126), donde se realizaban

curvas por un trazado de SL, en el presente estudio, el esquiador bajó en descenso directo. Posiblemente, el hecho de bajar en descenso directo sin realizar curvas hizo que el cuerpo del esquiador no se inclinara hacia el interior del viraje, situación en la que el magnetómetro pasa más lejos de la barra magnética. Sin embargo, el descenso directo se asemeja a la posición que lleva el esquiador en las primeras puertas de un trazado, cuando todavía no lleva suficiente velocidad para inclinarse. Por lo tanto, creímos interesante poder detectar el flujo magnético del imán en esta situación.

En conclusión, la barra magnética utilizada no es capaz de inducir un campo magnético lo suficientemente grande como para ser detectado por el magnetómetro del dispositivo IMU durante una situación de descenso directo en esquí, con lo que se decidió desarrollar otro prototipo de barra magnética con una profundidad de campo mayor.

Fase 2: Material y métodos

Dos esquiadores alpinos de competición del grupo de tecnificación de la Federación Catalana de Deportes de Invierno (FCEH) (esquiador 1: 19,0 años, 172 cm, 70,5 kg, 76,02 puntos FIS de SL; esquiador 2: 19,0 años, 183 cm, 75 kg, 76,48 puntos FIS de SL) participaron en el estudio. Los esquiadores se eligieron por ser de dos alturas diferentes. El esquiador 2 se eligió expresamente por ser de una altura considerable dentro de lo que sería una altura estándar en el esquí.

Se construyeron dos barras magnéticas de 25 mm de diámetro y 216 mm de altura (D25 mm x 216 mm, ND35, A. C. Magnets 98, Barcelona, España) (figura 23, fase 2). Estas tenían una profundidad de campo un 40% mayor que la barra utilizada en la fase 1. Se realizaron pruebas en las pistas de esquí en situación real de entrenamiento. Con la supervisión de los técnicos de la FCEH, se marcó un trazado de SL de 20 puertas siguiendo las

indicaciones de la FIS (11). En el trazado se enterró una barra magnética en la primera y en la sexta puerta (figura 26). La primera puerta se situó a 7 m de la salida. Los esquiadores realizaron cuatro bajadas por el trazado con el dispositivo IMU colocado en la zona baja de la espalda.



Figura 26. Detalle de la colocación de la barra magnética en el lado interior de la primera puerta del trazado.

Fase 2: Resultados

A diferencia de los resultados obtenidos en fase 1, en esta fase se pudieron detectar visualmente (figura 27 *a* y *b*) los picos en la señal del magnetómetro que indicaban el momento en que los esquiadores pasaron por la primera y la sexta puerta del trazado de SL, de manera que la sección (puerta 1 - puerta 6) quedó delimitada en todas las bajadas y para todos los esquiadores. No obstante, en todas las bajadas, el pico correspondiente a la primera puerta siempre tuvo una magnitud menor que el pico correspondiente a la sexta puerta. Además, para los registros pertenecientes al segundo esquiador se detectaron picos de menor intensidad en comparación con los registros del primer esquiador. De los tres ejes del magnetómetro que midieron el flujo magnético, el eje *x* (vertical) es el que presentó los picos de mayor magnitud.

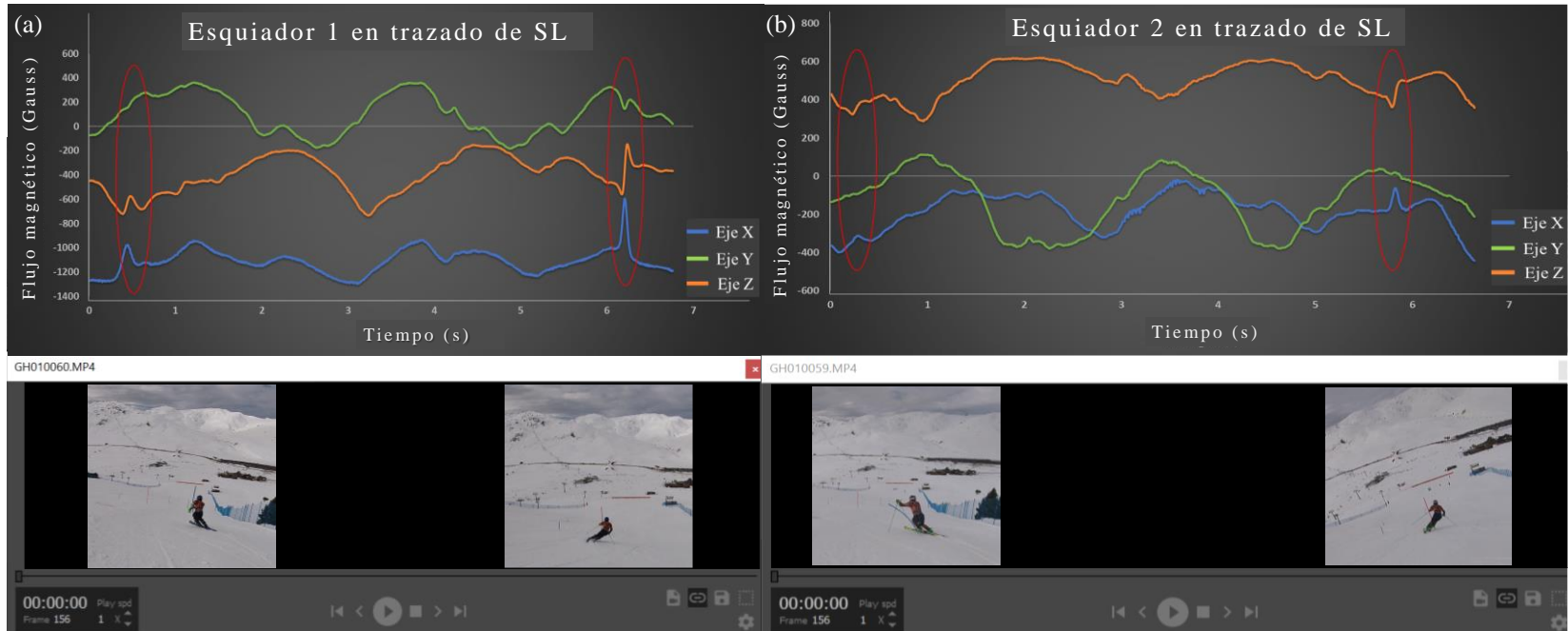


Figura 27. Registros del magnetómetro correspondientes a la segunda bajada del primer esquiador (a) y del segundo esquiador (b). Se representa el flujo magnético de los tres ejes del magnetómetro. El eje x es el vertical, el eje y es el lateral y el eje z es el anteroposterior. Los círculos rojos están indicando la presencia de los picos en la primera y sexta puertas del trazado. Las imágenes del vídeo estaban sincronizadas con el dispositivo IMU y se corresponden con el momento en que el esquiador pasó por cada una de las puertas analizadas.

Fase 2: Discusión y conclusiones

Tal y como se observa, en ambos registros, el pico de flujo magnético referente a la primera puerta del trazado es más débil que el de la sexta puerta. Esto se atribuyó a que, en la primera puerta, el esquiador va a poca velocidad y con el cuerpo poco inclinado, lo que provoca que el magnetómetro pase más lejos de la barra magnética. En cambio, en la sexta puerta, el esquiador ya lleva más velocidad, lo que le permite inclinarse hacia la puerta, y disminuir la distancia entre el magnetómetro y la barra magnética (figura 28 a y b).



Figura 28. (a) Posición del esquiador 2 al pasar por la primera puerta del trazado; (b) posición del esquiador 2 al pasar por la sexta puerta del trazado. Las flechas amarillas indican la distancia entre el magnetómetro y la barra magnética.

Debemos resaltar que el segundo esquiador era muy alto en comparación con el primer esquiador, por lo que el magnetómetro quedó más alejado de la barra magnética en su caso. Esta podría ser una explicación de por qué, en los registros del segundo esquiador, la aparición del pico de flujo magnético es prácticamente inexistente en la primera puerta (figura 27 b).

Finalmente, se observa que, para una colocación vertical de los imanes, donde el campo magnético procedía del suelo hacia arriba, el eje x (vertical)

del magnetómetro era el que recogía los picos de flujo magnético de mayor magnitud y, por tanto, este fue el eje que se seleccionó para los estudios de esta tesis.

En conclusión, después de las observaciones de los registros del magnetómetro se considera necesario aumentar aún más la profundidad de campo de las barras magnéticas para que se detecte mejor el flujo magnético en situación real al bajar por los trazados de SL. No obstante, se descarta la colocación de los imanes en la primera puerta del trazado y se recomienda la colocación de estos en las puertas donde el esquiador ya lleva una cierta velocidad e inclinación (normalmente, a partir de la tercera o cuarta puerta).

Fase 3: Material y métodos

Un esquiador alpino de categoría máster que compite regularmente en los campeonatos del mundo de la FIS (31 años, 180 cm, 75 kg, 43,48 puntos FIS de SL) participó en el estudio.

Se construyeron varias barras magnéticas de 33 mm de diámetro y 267 mm de altura (D33 mm x 267 mm, ND35, A. C. Magnets 98, Barcelona, España) (figura 23, fase 3). Estas tenían una profundidad de campo un 25% mayor que las barras utilizada en la fase 2. Se realizaron pruebas directamente en las pistas de esquí en situación de entrenamiento. Con la supervisión de dos técnicos, se marcó un trazado de SL de 26 puertas siguiendo las indicaciones de la FIS (11). El trazado tenía dos secciones claramente diferenciadas por su pendiente. De la puerta 7 a la puerta 14, la pendiente media era de $20,5^\circ$ (37,4 %). De la puerta 18 a la 25, la pendiente media era de $15,4^\circ$ (27,5 %). Se eligieron cuatro puertas consecutivas de cada sección, donde se enterraron las barras magnéticas descritas. El esquiador realizó cuatro bajadas por el trazado con el dispositivo IMU colocado en la zona baja de la espalda.

Fase 3: Resultados

En ambas pendientes, la magnitud de los picos de flujo magnético registrados por los tres ejes del magnetómetro aumentó con respecto a las pruebas realizadas en la fase anterior (figura 29 a y b). Para la colocación vertical de la barra magnética, el eje x (vertical) del magnetómetro muestra picos positivos. El instante del valor máximo del pico de flujo magnético coincide con el instante en que el esquiador ha pasado justo por encima de la barra magnética. El eje y (lateral), en cambio, muestra picos positivos y negativos dependiendo del lado por el que está pasando el esquiador respecto a la barra magnética: cuando pasa por el lado izquierdo (curva a la derecha), el valor del pico de flujo magnético es negativo y, cuando pasa por el lado derecho (curva a la izquierda), el valor es positivo. Finalmente, el eje z (anteroposterior) muestra un doble pico negativo-positivo, que se corresponde con el momento en que el sensor queda situado antes (pico negativo) y después (pico positivo) de la barra magnética, es decir, antes y después del paso por la puerta, siendo el valor cero el que corresponde a la distancia mínima entre el magnetómetro y la barra magnética.

Fase 3: Discusión y conclusiones

A partir de los resultados satisfactorios en la detección del campo magnético se decide que esta barra magnética será la que se utilizará para el estudio 1 de esta tesis. Además, se elige el eje x del magnetómetro como eje de referencia para determinar el momento del paso por la puerta, entre otras razones, porque los picos siempre son positivos, facilitando el análisis de los datos. Se descarta utilizar los otros ejes y el módulo de estos.

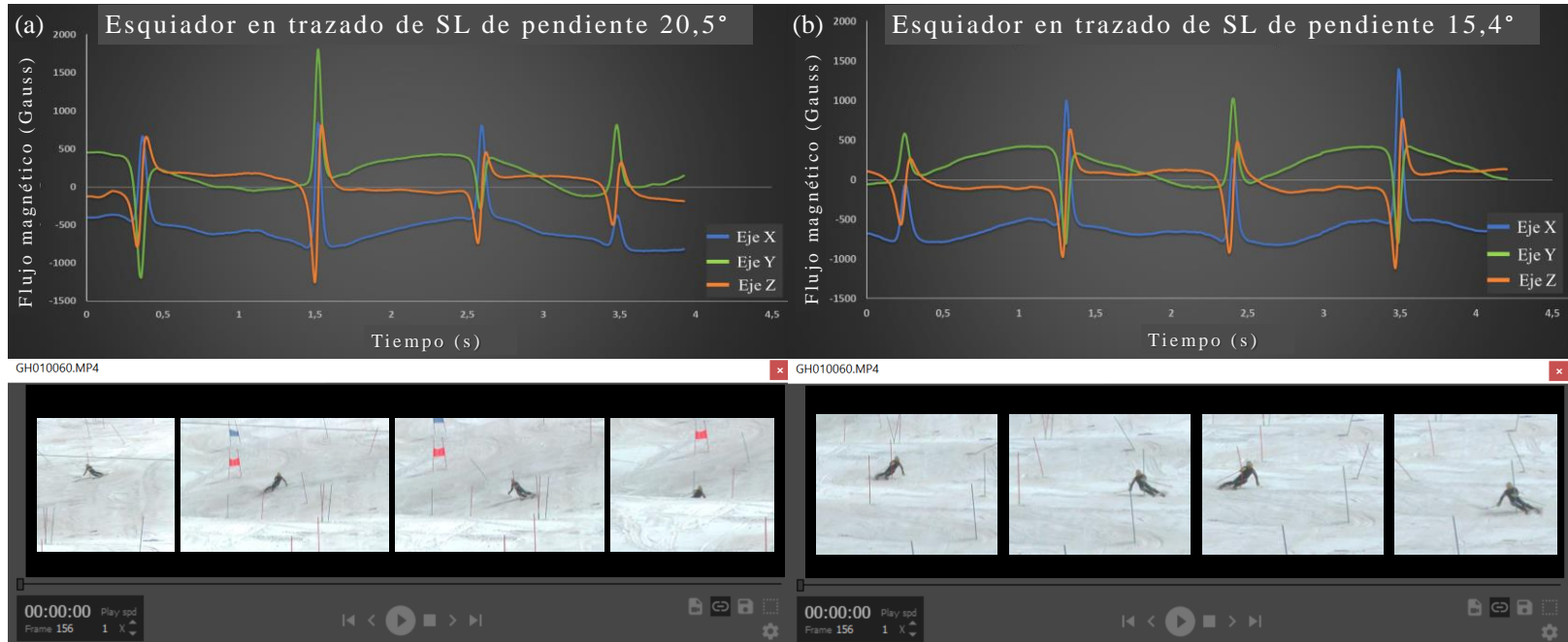


Figura 29. Registro del magnetómetro correspondiente a las cuatro puertas consecutivas de la primera bajada por cada sección. El gráfico *a* corresponde a la sección de 20,5° de pendiente, y el *b*, a la sección de 15,4° de pendiente. Se representa el flujo magnético de los tres ejes del magnetómetro. El eje *x* es el vertical, el eje *y* es el lateral y el eje *z* es el anteroposterior. Las imágenes del vídeo estaban sincronizadas con el dispositivo IMU y corresponden con el momento en que el esquiador pasaba por cada una de las puertas analizadas.

Fase 4: Material y métodos

En la fase 4, la participante fue la autora de la tesis (27 años, 169 cm, 53 kg), en este caso no se tuvo en cuenta la altura ya que en la fase anterior se comprobó que las últimas barras magnéticas tenían una profundidad de campo suficiente para detectar el paso de esquiadores altos.

Esta fase se realizó con patines en línea en una situación que simulaba las condiciones del esquí (figura 30). Se marcó un trazado de SL de cuatro puertas (conos). En las cuatro puertas se colocaron las barras magnéticas de 33 mm de diámetro y 267 mm de altura (D33 mm x 267 mm, ND35, A. C. Magnets 98, Barcelona, España). Estas se colocaron con un soporte que aumentaba su base de sustentación. Se utilizó un sistema de cronometraje basado en fotocélulas de haz simple de tipo reflector (Witty System, Microgate, Italia) como sistema de referencia para medir el tiempo transcurrido entre puertas y el tiempo total. La colocación de las fotocélulas se hizo siguiendo la reglamentación de la FIS (138). La patinadora realizó 20 pasadas por el trazado viniendo de una velocidad lanzada y con el dispositivo IMU colocado en la zona baja de la espalda.

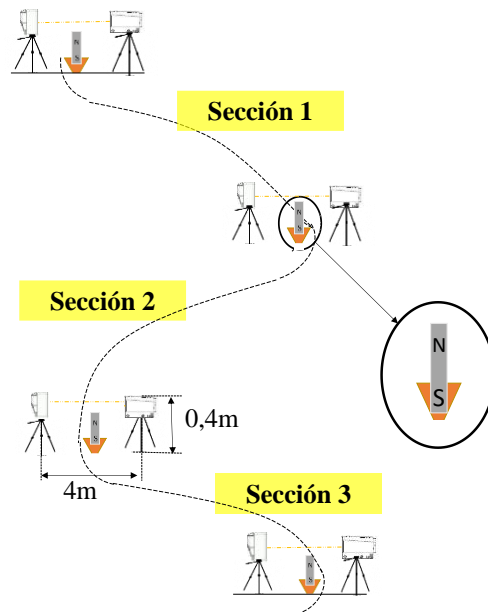


Figura 30. Diagrama del trazado realizado, las tres secciones analizadas, la posición de las barras magnéticas y las fotocélulas.

Fase 4: Resultados

Los tiempos de las tres secciones analizadas (figura 30) se obtuvieron instantáneamente con las fotocélulas. En cambio, los tiempos de las tres secciones obtenidos por el M-BTS se calcularon *a posteriori*. Se utilizó el *software* SPRO (Realtrack Systems, Almería, España) para descargar los datos registrados por el magnetómetro, concretamente por el eje x (vertical). Se configuró manualmente la herramienta de detección de picos de SPRO para que detectara los picos de flujo magnético positivos máximos con una duración de entre 200 y 2000 ms (figura 31). El tiempo total se obtuvo de la suma de los tiempos de las tres secciones. Los gráficos de la regresión lineal y Bland-Altman mostraron visualmente las diferencias entre los dos sistemas para los diferentes tiempos de sección y para el tiempo total (figura 32). Se observó una diferencia media (sesgo) de $0,005 \pm 0,033$ s y unos límites de acuerdo del 95 % de $-0,059 - 0,070$ s al analizar todas las

4. Estudios

secciones y el tiempo total. Se encontró una correlación muy alta y significativa entre ambos sistemas ($R^2 = 0,99$).



Figura 31. Registro del magnetómetro correspondiente a las cuatro puertas. Se representa el flujo magnético del eje x (vertical). Los recuadros amarillos muestran el tiempo transcurrido entre picos calculado automáticamente con el programa SPRO. Las imágenes estaban sincronizadas con el dispositivo IMU y corresponden al momento en que el patinador pasaba por cada una de las puertas analizadas.

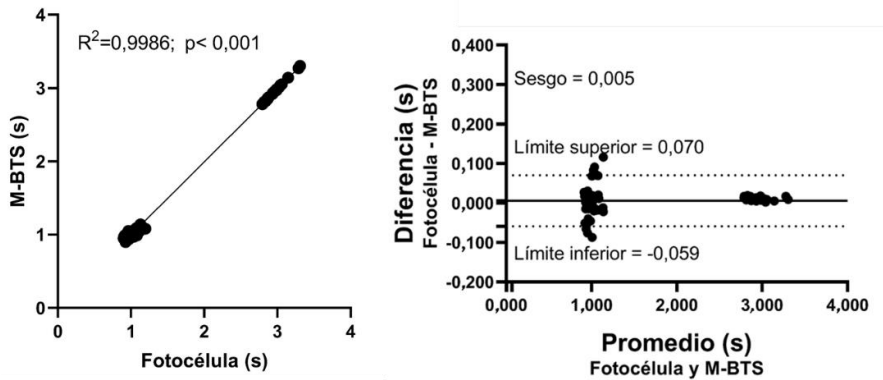


Figura 32. Gráficos de regresión lineal (izquierda) y Bland-Altman (derecha) del tiempo medido utilizando el M-BTS frente al tiempo obtenido utilizando fotocélulas. La línea diagonal representa la línea de identidad (pendiente = 1; intercepción = 0). La línea sólida dentro del gráfico representa el sesgo. Las líneas discontinuas representan los límites superior e inferior del 95 % de acuerdo.

Fase 4: Discusión y conclusiones

El M-BTS mostró diferencias relativamente pequeñas y una leve dispersión en comparación con las mediciones de las fotocélulas. Las diferentes fases de este primer ensayo impulsaron el desarrollo del estudio 1 de esta tesis (*Validity of a Magnet-Based Timing System using the Magnetometer Built into an IMU*). Con todo, se decidió: (a) utilizar las barras magnéticas desarrolladas en la fase 3, (b) colocar los imanes a partir de la tercera o la cuarta puerta para que los esquiadores puedan alcanzar una cierta velocidad que les permita inclinarse y, por ende, acercar el magnetómetro al imán, y (c) elegir el eje x del magnetómetro para el cálculo de los intervalos de tiempo en el postprocesamiento.

4.1.2. Publicación

Esta publicación es una versión original de: Pérez-Chirinos Buxadé C, Fernández-Valdés B, Morral-Yepes M, Tuyà Viñas S, Padullés Riu JM, Moras Feliu G. Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU. *Sensors*. 2021;21(5773):1–13. Published 2021 Aug 27. doi:10.3390/s21175773



Article

Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU

Carla Pérez-Chirinos Buxadé ¹, Bruno Fernández-Valdés ^{1,2}, Mónica Morral-Yepes ¹, Sílvia Tuyà Viñas ¹, Josep Maria Padullés Riu ¹ and Gerard Moras Feliu ^{1,*}

¹ National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), University of Barcelona (UB), 08038 Barcelona, Spain; cperezchirinos@gencat.cat (C.P.-C.B.); bfernandez-valdes@tecnocampus.cat (B.F.-V.); monicamorralyepes@gmail.com (M.M.-Y.); siltuvi22@gmail.com (S.T.V.); jmpadu@gmail.com (J.M.P.R.)
² School of Health Sciences, TecnoCampus, Pompeu Fabra University, 08302 Barcelona, Spain
* Correspondence: gmoras@gencat.cat

Abstract: Inertial measurement units (IMUs) represent a technology that is booming in sports right now. The aim of this study was to evaluate the validity of a new application on the use of these wearable sensors, specifically to evaluate a magnet-based timing system (M-BTS) for timing short-duration sports actions using the magnetometer built into an IMU in different sporting contexts. Forty-eight athletes (22.7 ± 3.3 years, 72.2 ± 10.3 kg, 176.9 ± 8.5 cm) and eight skiers (17.4 ± 0.8 years, 176.4 ± 4.9 cm, 67.7 ± 2.0 kg) performed a 60-m linear sprint running test and a ski slalom, respectively. The M-BTS consisted of placing several magnets along the course in both contexts. The magnetometer built into the IMU detected the peak-shaped magnetic field when passing near the magnets at a certain speed. The time between peaks was calculated. The system was validated with photocells. The 95% error intervals for the total times were less than 0.077 s for the running test and 0.050 s for the ski slalom. With the M-BTS, future studies could select and cut the signals belonging to the other sensors that are integrated in the IMU, such as the accelerometer and the gyroscope.

Keywords: inertial measurement unit; wearable sensor; timing system; gate crossing time; performance; sports biomechanics; running; skiing



Citation: Pérez-Chirinos Buxadé, C.; Fernández-Valdés, B.; Morral-Yepes, M.; Tuyà Viñas, S.; Padullés Riu, J.M.; Moras Feliu, G. Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU. *Sensors* **2021**, *21*, 5773. <https://doi.org/10.3390/s21175773>

Academic Editors: Darren Stefanyshyn and Christian Clermont

Received: 21 July 2021
Accepted: 25 August 2021
Published: 27 August 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Time is one of the decisive parameters of performance in many sports [1,2]. In individual sports, such as athletics (running) or winter sports disciplines such as alpine skiing, time will determine the position in the ranking. In alpine skiing, for example, the ranking difference depends on hundredths of a second [3,4], and any small detail can change the standings. In 2020, for instance, at the FIS Alpine Ski World Cup in Madonna di Campiglio (Italy), the difference between first and fourth place in the overall time was less than half a second. Moreover, among the top ten skiers, there were differences of less than 1 s [5].

Differences of hundredths of a second in a one-minute race, following the example above, represent a percentage of less than 0.03% of the total time. Therefore, knowing the time elapsed between the start and the finish line does not provide sufficient information with which to qualitatively evaluate a skier's performance along the course [6,7]. In athletics, the same occurs, the total time is too general, and therefore it is common to train with intermediate times [8]. For example, a 100-m race is divided in different sections and the time of each section is obtained. In this way, the coach has information on each phase of the race: acceleration, maximal velocity and reduction of velocity [9,10]. In skiing, intermediate times are often measured during training and competition contexts, usually a middle time and a final time to delimit changes of slope or changes of pace within the course [11]. However, it has been shown that these intermediate times still provide too general information to explain performance in the case of skiing [6]. It has been noted that

gate-to-gate times can provide additional data to further analyze skiers' performance [12,13]. Although it is not possible to officially obtain more information on gate crossing times during competitions, it is possible to obtain this information during training sessions.

In technical skiing disciplines such as slalom and giant slalom, the time between gates can range from less than one second to less than two seconds [14], the same time it can take to complete a 10-m race [8]. Therefore, to measure this type of short-duration actions accurate and reliable measurement systems would be needed. Currently, one of the most widely used timing technologies in these sport contexts is the photocell [15]. Electronic timing provides an accurate and instantaneous result, which makes it easy to quickly compare a large group of skiers or athletes. Because of these characteristics, this is the timing equipment used in official competitions governed by FIS regulations [16] and it is also one of the reference systems used as gold standard in sport research [12,13,17–19]. However, some of the limitations include: the time taken for correct positioning and alignment, the high economic cost, the weather conditions that can affect time measurements, e.g., extreme temperatures [16], the fact that each athlete can cut the light beam with a different part of the body [20], and the reduced number of times that could be taken along a course in relation to the number of gates, as in the case of skiing. Another system used for accurate time measurement is recording with video or high-speed cameras, measuring between 100 and 1000 Hz [15]. Video and photo finish are the official timing systems in high-level athletics competitions [15,21]. Despite the high precision that can be obtained, it is a system that requires considerable time to set up since it is necessary to provide and align visual references in order to correct the error that the observer may have [22]. In the case of skiing, the use of video analysis could limit the number of gates to be analyzed [2,23,24]. In addition, the fact that time is not presented immediately, since a software is needed to analyze the recordings makes it not a field method for training days and its use is more suitable for research [15].

In recent years, there have been authors who have validated other methods to control time in a more practical, economic, and detailed way. Supej et al. [12] validated a new method for time computation from surveyed trajectories using a high-end global navigation satellite system (GNSS). They validated it in two different contexts: running and skiing. This system, however, involves carrying a backpack on the back with a light weight antenna that could influence the skier's technique [25]. In addition, it can only be used outdoors, and an alternative must be found for indoors. Fasel et al. [13] validated a magnet-based timing system (M-BTS) for detecting gate-to-gate time in alpine ski racing using the magnetometer of an inertial measurement unit (IMU) and several magnets. This is a lighter, more ecological, and easier to use alternative method for the measurement of multiple times over long distances in alpine skiing and other sports, regardless of the place where they are practiced. In addition, the use of IMUs in sports training has made it easier to obtain kinematic and kinetic data on movement [26–31]. The fact that all the built-in sensors (accelerometer, gyroscope, GNSS receiver, magnetometer, etc.) are synchronized optimizes data collection. However, nowadays there are IMUs from different manufacturers with different characteristics such as the sampling frequency used, which can affect their validity.

To our knowledge, no study has explored the validity of a M-BTS using the magnetometer built into an IMU in different sporting contexts. Therefore, the aim of this study was to evaluate the validity of a M-BTS for timing short-duration sport actions using an IMU's magnetometer in a linear sprint running test and in an alpine ski slalom.

2. Materials and Methods

2.1. General Overview

Two independent experiments were carried out. The first involved athletes performing a linear sprint running test in a soccer field, to assess the validity of the proposed system in an athletic environment. The second involved skiers performing a slalom on a ski slope. The two experiments pursued the same aim but under different conditions (Figure 1).

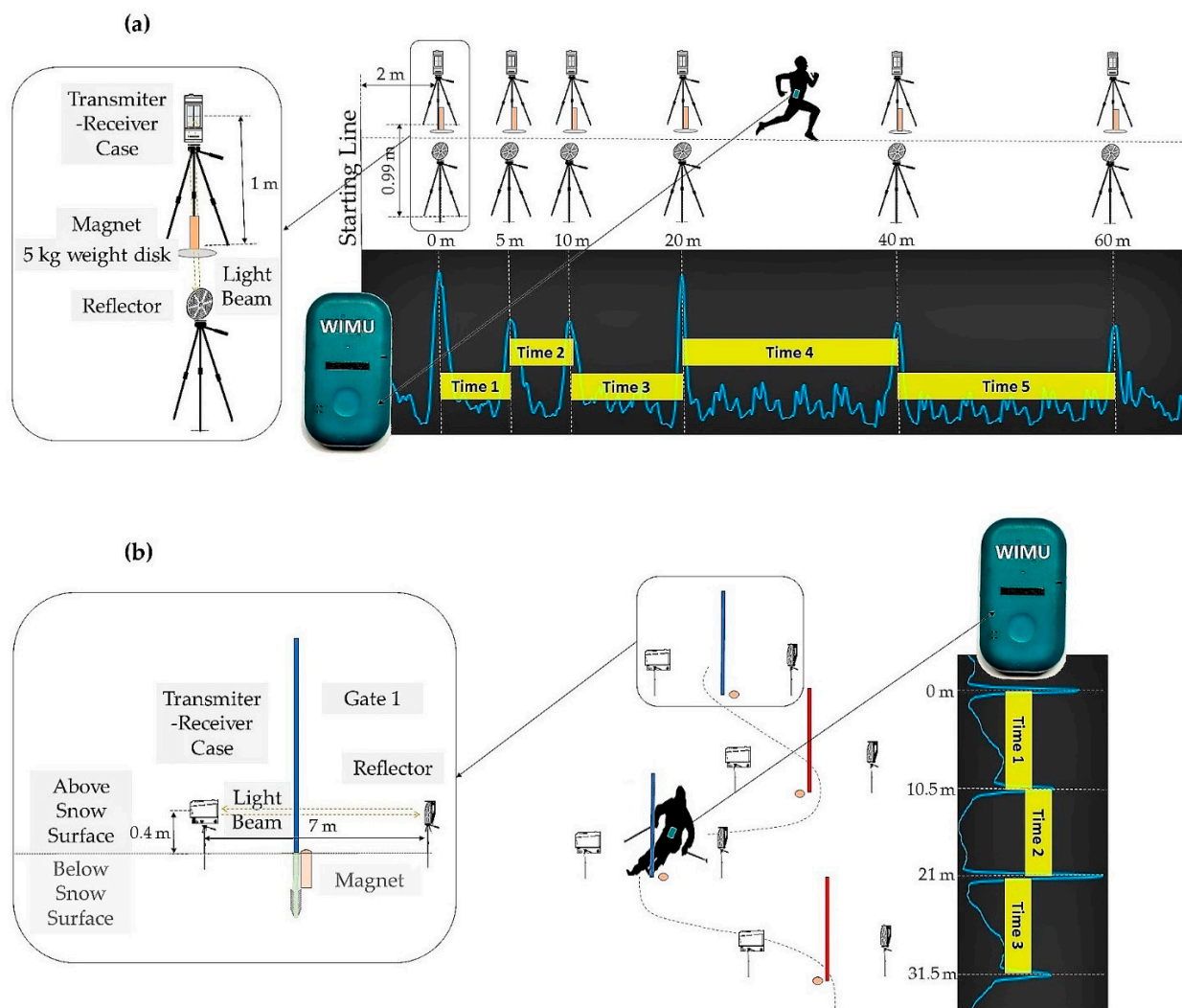


Figure 1. Diagram of (a) an athlete performing the 60-m linear sprint running test, and (b) a skier going down the slalom wearing an IMU device at the lower back and passing through the gates created with the photocells and magnets. The gray boxes represent the peak-shaped magnetic field recorded by the IMU's magnetometer when passing close to the magnets at a given speed. The small yellow boxes represent the section times obtained between peaks. The photographs show the placement of the magnets in both environments.

2.2. Subjects

Athletes: Forty-eight experienced, recreational level athletes (22.7 ± 3.3 years, 72.2 ± 10.3 kg, 176.9 ± 8.5 cm, 109.9 ± 7.7 cm trochanteric height, 7.2 weekly training hours) participated in the study.

Skiers: Eight alpine skiers (17.4 ± 0.8 years, 176.4 ± 4.9 cm, 67.7 ± 2.0 kg, 128.8 ± 26.6 slalom FIS-Points) participated in the study.

Written informed consent was obtained from all participants or by their parents in case they were under 18 years of age. All the procedures were approved by the Ethics Committee for Clinical Sport Research of Catalonia (Study Number: 27/CEICGC/2020) and were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki.

2.3. Procedures

In both experiments, an IMU device (WIMU, Realtrack Systems, Almeria, Spain) weighing 70 g and with a size of $81 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ was attached to the lower back of athletes and skiers, at the L4–L5 level, using an adjustable sports lycra belt (Figure 2).

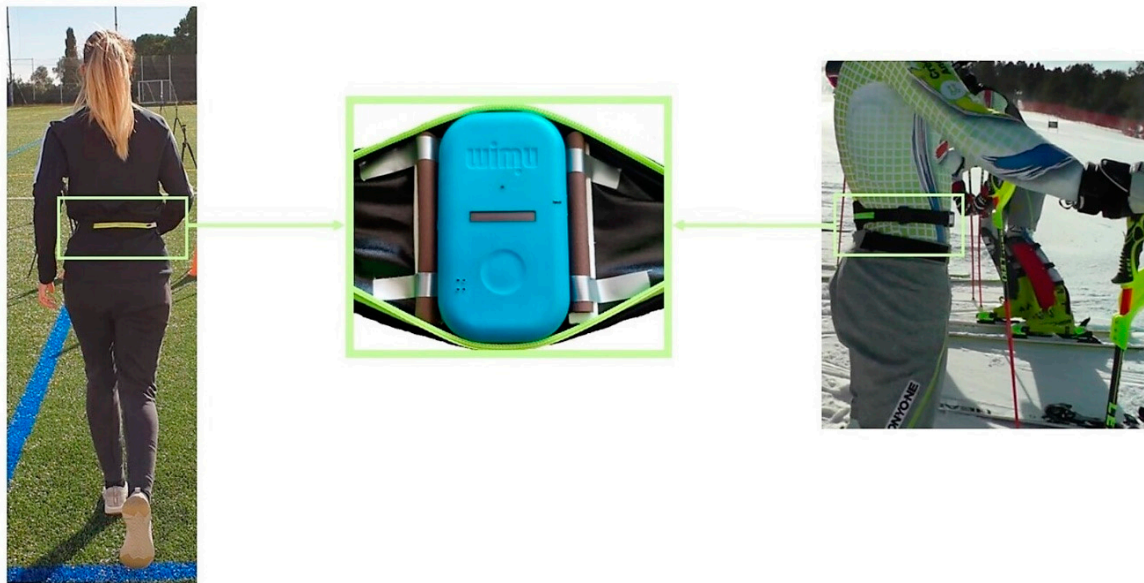


Figure 2. IMU device fixed on the athlete/skier's lower back, at the L4–L5 level using an adjustable sports lycra belt.

This location close to the center of gravity (CG) can be easily attached and detached and it is a comfortable place to carry by athletes. Besides, it has been shown that this is the best place to assess whole body movement and to detect ski turns [32,33]. The wearable sensor also contains a 3D magnetometer recording at 100 Hz which allows a resolution of hundredths of a second. It uses anisotropic magnetoresistive technology. The units of measurement are milligauss, and its maximum scale is ± 8 Gauss. When the IMU is turned on it chooses the scale that creates the best for the environment it is located in at that moment, the typical is between ± 2 Gauss and ± 4 Gauss. For the two experiments, IMU calibration was performed on a flat and even surface with the z-axis perpendicular to the surface, according to the manufacturer's specifications.

Bar magnets of diameter 33 mm and height 267 mm (D33 mm \times 267 mm, ND35, A.C. magnets 98, Barcelona, Spain) were designed and used for both experiments.

A standard time keeping system based on photocells (Witty System, Microgate, Italy) was used to validate the M-BTS. A reflector-type single-beamed photocell system was used, where the photocell had the transmitter and receiver electronics in the same case. A simple reflector on the opposite side was used to reflect the photocell beam back to the main unit. This placement of the photocells is reminiscent of a gate that the athlete/skier will have to cross. Hence the section time is also called gate crossing time. A resolution of thousandths of a second was obtained.

In both experiments, several section times were obtained instantly with the photocells and noted. The section times collected by the M-BTS were not obtained instantly but were calculated afterwards. Each time an athlete or skier passed near a bar magnet, a peak appeared in the magnetometer time series. SPRO software (Realtrack Systems, Almeria, Spain) was used to download the data stored in the IMU in order to calculate the elapsed time between peaks (Figure 1). The magnetometer source signal was used as the dominant peaks corresponded to the gate locations. Since the magnets were placed vertically, the magnetic field came from the ground upwards. For this magnet placement, the vertical x -axis of the IMU magnetometer was the one that collected the highest magnitude peaks and was therefore selected. The signal was loaded into the program workspace and the selection tool was used to select the signal chunks corresponding to the sprints and the downhill ski slaloms to be analyzed. The SPRO peak detection tool was then manually configured to detect the maximum positive peaks lasting between 200 and 2000 ms and the time between peaks was automatically detected.

2.3.1. Experiment 1

Athletes were asked to complete a 60-m linear sprint running test at maximum speed. All test sessions were performed at an outdoor grass soccer field. Prior to the start, participants were instructed to perform a 15 min warm-up of their choosing and then performed the test. The 60-m linear sprint running test was divided into five different sections: the 0–5 m section, the 5–10 m section, the 10–20 m section, the 20–40 m section, and the 40–60 m section. Six bar magnets were used to cover all the distance. Bar magnets were placed at the beginning and at the end of each section, as detailed in (Figure 1a). After observing that there were no changes in the magnetic field, bar magnets were placed on top of a metal base of a 5 kg weight disk to ensure their fastening (Figure 1a). They were positioned vertically with the north pole pointing upwards. Previous tests in the laboratory revealed that the bar magnets distort the magnetic field up to a distance of about 1 m. Therefore, in order to ensure that the athletes passed close enough, a corridor of no more than 1 m wide was chosen. Six sets of photocells were placed in line with the magnets and were set approximately at hip height according to the recommendations of Yeadon, Kato, and Kerwin in 1999 for a single beam system [20].

This setup allowed to obtain five intermediate times-corresponding to each section-for each system: photocells and M-BTS. Referring to this last one, six peaks were detected for each trial in the magnetometer signal. The total time was defined as the time sum of the five sections.

Five athletes were discarded due to poor detection of the first peak in the magnetometer signal. This occurred because the starting line of the running test coincided with the position of the first bar magnet. After these subjects, the starting line was modified and moved 2 m forward from the first bar magnet (Figure 1a).

During the four days of data collection, an average air temperature of 10 °C was recorded, with minimum and maximum temperatures of 7 °C and 13 °C, respectively. The maximum wind speed recorded was 0.02 km/h and was not considered.

2.3.2. Experiment 2

Skiers were asked to complete a run in a 40-gate slalom course at maximum speed. Only gates 21–24, hereinafter referred to as gates 1–4, were considered for the study (gate distance: 10.5 m; gate offset: 3.5 m). All gate distances and course settings were according to the International Ski Federation (FIS) rules [34]. The four gates formed 3 sections: the first section between gates 1 and 2, the second section between gates 2 and 3, and the third section between gates 3 and 4. Following the guidelines set by Fasel et al. [13], on the inner side of each gate's turning pole and very close to the base, four bar magnets were buried vertically into the snow such that the top was slightly below the snow surface (Figure 1b). Four sets of photocells were used to measure the reference time and were installed 10 cm above gates 1–4 and below knee height, in accordance with the FIS rules [34]. In order to avoid any unnecessary risk of injury, a 7 m width between the transmitter/receiver and the reflector was set.

This setup allowed to obtain three intermediate times, corresponding to each section, for each system: photocells and M-BTS. Referring to this last one, four peaks were detected for each run in the magnetometer signal. The total time was defined as the time sum of the three sections.

During data collection, the snow and air temperatures progressively increased from -7.1 to -2.4 °C and from -4.1 to -2.3 °C, respectively. The maximum wind speed recorded was 5.2 km/h in a south-westerly direction, thus perpendicular to the direction of the ski run.

2.4. Statistical Analysis

In both contexts, sample distributions were tested for normality with a Shapiro–Wilk test. In the running, a dataset of 43 trials, one trial for each athlete, was used for validation. The same criteria were followed for skiing, resulting in a dataset of 8 runs.

The criterion validity of time measured by the M-BTS was assessed using mean time differences and the 95% error-range against actual time obtained from photocells. Mean time differences were defined as the reference system's values minus the proposed system's values, and the 95% error-range was defined as the range between the 2.5th and 97.5th percentiles. Bland–Altman plots were used to graphically complement the differences between the two systems [35]. Additionally, the intraclass correlation coefficient (ICC) with corresponding 95% confidence intervals (CI) and linear regression analysis were used for agreement evaluation between both systems.

Data analysis was conducted using PASW Statistics 21 (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA). It was set as excellent agreement that the ICC using a two-way mixed-effects model was ≥ 0.75 [36]. The significance level was set at 0.05 for all analyses.

3. Results

Data did follow normal distribution. Section times and total times provided by photocells and the M-BTS and the mean differences between both systems, are presented in Table 1. Differences between the two measurement systems were no significant in any of the contexts, neither in overall section times (Running $p = 0.559$, Skiing $p = 0.880$), nor in the total time (Running $p = 0.684$, Skiing $p = 0.884$). All data can be accessed in the Supplementary Data file.

In the running context, the overall section time 95% error-range was (−0.024 s; 0.068 s). The 95% error-range for the total time was (0.011 s; 0.087 s). In the case of skiing, the overall section time's 95% error-range was (−0.079 s; 0.061 s). The 95% error-range for the total time was (−0.035 s; 0.015 s) (Table 1).

The Bland–Altman plots visually showed the differences between the two systems for the different section times and for the total time in both sport contexts (Figure 3). In the context of running, a lower bias (0.011 ± 0.021 s) and a narrower LOA (−0.030–0.052 s) were observed when analyzing all sections compared to total time (Bias: 0.054 ± 0.023 s; LOA: 0.008–0.099 s). For skiing, the total time obtained a slightly higher bias (-0.013 ± 0.020 s) and a narrower LOA (−0.052–0.026 s) than the analysis of all sections (Bias: -0.004 ± 0.043 s; LOA: −0.089–0.080 s). Linear regression analysis confirmed these results with high levels of model explanation for the two sport contexts.

Excellent ICCs between measured and actual time were found in all sections (Running: 1.00, 95% CI = 0.99–1.00; Skiing: 0.95, 95% CI = 0.88–0.98) and in the total time (Running: 1.00, 95% CI = 0.99–1.00; Skiing: 0.99, 95% CI = 0.98–0.99).

Table 1. Mean difference of the time obtained through the M-BTS against the actual time obtained from Photocells.

		Distance (m)	Speed (Km/h)	Photocell Time (s)	M-BTS Time (s)	Mean Difference (s)	2.5th Percentile (s)	97.5th Percentile (s)	95% Error-Range (s)
Running	Section 1 (0–5 m)	5.00	22.92 ± 1.64	0.789 ± 0.058	0.757 ± 0.053	0.032 ± 0.023	−0.007	0.068	0.076
	Section 2 (5–10 m)	5.00	26.11 ± 1.72	0.693 ± 0.050	0.677 ± 0.047	0.016 ± 0.018	−0.019	0.046	0.065
	Section 3 (10–20 m)	10.00	27.88 ± 1.81	1.297 ± 0.088	1.288 ± 0.090	0.008 ± 0.015	−0.009	0.041	0.049
	Section 4 (20–40 m)	20.00	28.63 ± 2.18	2.530 ± 0.208	2.531 ± 0.207	−0.0003 ± 0.013	−0.023	0.020	0.043
	Section 5 (40–60 m)	20.00	27.84 ± 2.28	2.640 ± 0.228	2.607 ± 0.229	−0.003 ± 0.012	−0.024	0.031	0.055
	Total (0–60 m)	60.00	27.44 ± 1.96	7.913 ± 0.606	7.860 ± 0.608	0.053 ± 0.023	0.011	0.087	0.077
Skiing	Section 1 (G1–2)	10.50	33.60 ± 3.10	1.133 ± 0.103	1.144 ± 0.090	−0.011 ± 0.049	−0.065	0.061	0.126
	Section 2 (G2–3)	10.50	38.03 ± 3.03	0.999 ± 0.073	0.983 ± 0.035	0.017 ± 0.047	−0.079	0.058	0.137
	Section 3 (G3–4)	10.50	34.23 ± 1.91	1.107 ± 0.064	1.126 ± 0.057	−0.019 ± 0.027	−0.048	0.034	0.082
	Total (G1–4)	31.50	35.09 ± 1.87	3.240 ± 3.253	3.253 ± 0.169	−0.013 ± 0.020	−0.035	0.015	0.050

Values are means ± SD. M-BTS, magnet-based timing system. For the 60-m linear sprint running test: Section 1 is the time elapsed from 0 to 5 m, Section 2 is the time elapsed from 5 to 10 m, Section 3 is the elapsed time from 10 to 20 m, Section 4 is the time elapsed from 20 to 40 m, Section 5 is the time elapsed from 40 to 60 m, Total Time is the sum of the five sections. For the ski slalom: Section 1 is the time elapsed between gate 1 and 2 (G1–2), Section 2 is the time elapsed between gate 2 and 3 (G2–3), Section 3 is the elapsed time between gate 3 and 4 (G3–4), Total Time is the sum of the three sections.

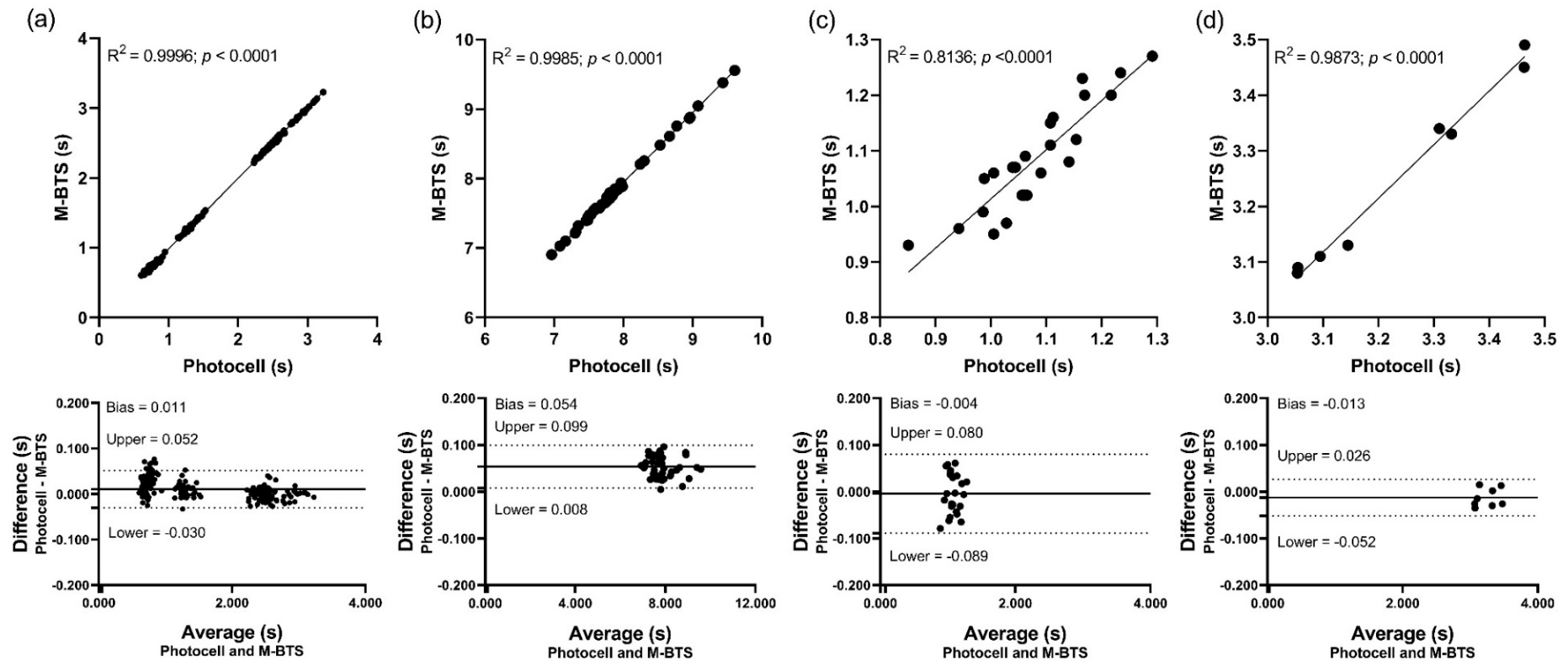


Figure 3. Scatterplots (above) and Bland-Altman plots (below) of time measured by M-BTS against the actual time obtained from Photocells. The diagonal line represents the identity line (slope = 1; intercept = 0). The solid line within the graph represents the bias. The broken lines represent the upper and lower 95% limits of agreement. (a) Belong to the linear running test and represent the analysis of the different section times, (b) belong to the linear running test and represent the analysis of the total time, (c) belong to de ski slalom and represent the analysis of the different section times (d) belong to de ski slalom and represent the analysis of the total time. M-BTS, magnet-based timing system.

4. Discussion

To our knowledge, this is the first study evaluating the validity of a M-BTS using the magnetometer built into an IMU in different sporting contexts. Two independent experiments were carried. The first took place in a soccer field with athletes performing a linear sprint running test and the second was conducted on a ski slope with skiers performing a slalom. The results demonstrate that M-BTS is valid for measuring short-duration sport actions about one second and above in different sport contexts.

In this study, the mean difference in all sections between the two systems obtained was 0.011 ± 0.021 s for the linear running test and -0.004 ± 0.043 s in the ski slalom (Figure 3). These results have increased the mean difference found in Fasel et al. (Skiing: -0.002 ± 0.005 s) [13] and Supej et al. (Running: 0.0005 ± 0.0070 s; Skiing: 0.0002 ± 0.0001 s) [12]. In relation to the 95% error-range for the total time it was 0.077 s for running and 0.050 s for skiing, which have also increased when compared with the 95% error-range obtained by the studies mentioned above [12,13]. These differences could be explained by several factors. Firstly, the sampling frequency of the IMU's magnetometer, which recorded at 100 Hz, provided a resolution of 0.01 s. For the highest velocity recorded in this study (up to 38 km/h), the resolution of the IMU's magnetometer resulted in an unmeasured displacement of approximately 10.5 cm. In slalom, maximum speeds of up to 55 km/h are usually reached [14], which would represent an unmeasured displacement of approximately 15 cm. A possible solution would be to increase the sampling frequency by linear interpolation if that degree of accuracy is needed [13]. Along these lines, the GNSS timing system developed by Supej et al. already used interpolation to detect the exact passage through the gate [12,37].

The second factor could be the speed. This parameter is a double-edged sword, since in the M-BTS, the peaks recorded at higher speed reduce their width, which allows for greater exactitude in their location [13]. The influence of the speed factor could be detected in the case of the linear running test in which each section had a different speed and a tendency for the dispersion of the time differences to decrease with increasing speed was found (Figure 3). In the case of skiing, the sections were very similar to each other in terms of distance and speed. Section 2 was slightly faster but no differences due to speed were observed in scatter plots. However, lower speeds (up to about 38 km/h) have been recorded compared to those obtained in the study conducted by Fasel et al. (above 50 km/h) [13], which could explain why they found the lowest mean differences between the M-BTS and the photocells.

Remaining in the context of skiing, another factor that could have increased the differences between the results obtained in the present study compared to Fasel et al. [13] is the level of the skiers. A higher level will determine the correct technical execution and approach to the slalom pole and consequently to the bar magnet. As mentioned above, the distance from the bar magnet is an important factor, the closer the magnet is passed, the greater the magnetic field distortion recorded by the IMU's magnetometer. In this sense, it could be deduced that the higher the level, the better the proposed timing system will work.

Therefore, since the times obtained through the proposed M-BTS have relatively small mean differences in section and total times and a narrow dispersion compared to the photocell measurements, the proposed system could be used instead of the photocells during regular trainings in different sport contexts considering that subtle performance changes below reported 95% error-ranges would not be detected.

Advantages of M-BTS: Compared to photocells, the M-BTS involves fixing the IMU in a body location, preferably the same for all subjects, and this eliminates the problem of athletes randomly breaking the photocell beams with different parts of the body [20]. The time triggering always occurred in the same situation: when the IMU passes closest to the magnet. As a curiosity, in the linear running test, in 70% of the cases M-BTS underestimate the time measured by photocells, and in 30% of the cases photocells have reported a shorter time than the M-BTS. These could be cases in which the beam could be triggered early by swing arms. Yeadon et al. [20] described a similar percentage in their study

with photocells positioned at hip height. In the case of skiing, however, the M-BTS have overestimated and underestimated the photocell values, by 60% and 40%, respectively. Placing the photocells lower and 10 cm forward with respect to the turning pole could have reduced false time-triggering with other body parts or with the pole itself.

The use of magnets instead of photocells reduces preparation time for coaches. No time is lost in the correct alignment of the transmitter/receiver with the reflector. This alignment is very important as it should be perpendicular to the direction of movement to minimize errors [12]. In linear movements, such as a sprint, this alignment is easier. However, in curvilinear movements it is more complex to determine the perpendicular orientation of the movement since for each run and skier will be different.

In addition, the M-BTS reduces the risk of an accident due to a collision with the photocells. Especially in the context of skiing where there is an official regulation on how to build and place the wooden posts that will hold the photocells [16]. This could also be of interest for team sports or sports involving implements such as balls, where ecological systems that modify the environment as little as possible are needed. Moreover, the M-BTS allows for more intermediate times, such as gate-to-gate times, which will give detailed performance information [12,13,37].

Compared to the GNSS-based approach, the proposed system configuration is more economical and easier to use for trainings, since no differential GNSS with a base station is needed and the position of each gate is not required to be surveyed. Except for the magnets, no additional hardware is requested. It is also a more ecological system for athletes/skiers than having to carry a backpack, as it only requires wearing a small lycra belt to put on the wearable device. In addition, it can be used anywhere, indoors or outdoors, and is not affected by adverse weather conditions.

Finally, the fact of using the M-BTS will allow to select the peaks obtained from the magnetometer signal as a marker to cut the signal of any of the other sensors such as the accelerometer, the gyroscope and the GNSS receiver, all of them integrated in the IMU. Often, it is difficult to find where a sports action begins and ends among the thousands of data reported by the IMU and this could be a solution for future studies. Going further, recent pioneering studies have combined the corresponding gate crossing timing information obtained by a M-BTS fused with inertial sensor information and gate location details to validated a system that estimates the 3D kinematics of the skiers' center of mass during competition events in alpine skiing [27]. It has also been shown that the M-BTS fusion with low-cost GNSS receivers can improve the accuracy of determining the kinematics of the center of mass in alpine ski racing [38].

Limitations of M-BTS: A total of 290 gate crossings were detected with the proposed system, 100% of the total number of crossings in both sport contexts. However, it should be noted that in the linear running test, five athletes had to be discarded due to poor detection of the first peak in the magnetometer signal. This occurred because the starting line of the running test coincided with the position of the first bar magnet, the fact of being located in the same place as the bar magnet caused the detection of a constant magnetic field, with no peaks appearing. An alternative should be considered if a magnet needs to be placed right at the starting location.

The results showed relatively small mean time differences in both contexts, but special attention should be paid to the linear run test, where a speed-dependent dispersion of time differences was observed, which decreased at higher speeds. Supej et al. [12] also detected this velocity dependence in a running test with the GNSS-based approach. In this sense, in competitive contexts, the use of photocells is recommended since the accuracy of the result does not depend on speed. In the case of skiing, we cannot affirm that the accuracy of the result is speed-dependent since it has not been tested in this study. It would be necessary for future studies to verify this aspect.

It should be noted that in the slalom discipline, the IMU passes very close to the magnet, as long as the skier's technical level does not limit them to pass close to the pole. A M-BTS system has also been tested with elite athletes in giant slalom [27]. However,

with lower-level athletes and especially in speed disciplines, gates may be passed with greater distances than 1 m in which magnetometer may not detect the magnetic field of the magnets. Other authors have suggested that this could be countered by increasing the strength of the magnetic field of the magnets or by placing several magnets along a line perpendicular to the intended ski trajectories [13,27]. In the context of running, as there is no need to bury the magnets for safety reasons, the magnets are placed directly on the ground surface as if they were sports cones or even, if necessary, could be lifted with sports poles to bring them closer to the athlete's IMU. In this sense, there is no distance limitation for similar sports contexts.

Nowadays, the use of software is necessary to treat the IMU magnetometer signal. The time between peaks is obtained instantaneously as there is a peak detection monitor. It should be noted that there would be an option to have the data loaded in real time with the help of an antenna that connects the IMU device to the computer via Bluetooth. However, the computer and the IMU cannot be far away, which in the context of skiing is unlikely. One possible solution would be to develop a system where timing data could be transmitted to a smartphone or tablet via Bluetooth. There are already companies that have implemented this type of system (Freelap USA, Pleasanton, CA, USA).

5. Conclusions

In technical skiing disciplines, such as slalom, as well as in sprint disciplines in athletics, the type of short-duration actions required accurate and reliable timing measurement systems. Currently, one of the most widely used timing technologies in these sport contexts is the photocell. However, this system has some limitations, such as time-consuming preparation and the high economic cost among others. In recent years, the possibility of using a M-BTS to measure short-term sports actions has become a good alternative. Therefore, this study evaluates the validity of a M-BTS for timing short-duration sport actions using an IMU's magnetometer. The M-BTS has proven to be valid for timing sports actions ranging from 0.6 to 7.9 s in a linear sprint running test and from 0.9 to 3.2 s in an alpine ski slalom. The proposed system could be used instead of photocells during regular training in different sport contexts considering that subtle performance changes below reported 95% error-ranges would not be detected. The M-BTS can be applied in different sports contexts, regardless of where they are practiced, maintaining the technical movements of athletes. As future applications, since the M-BTS could be used to section the time series of the other integrated sensors in the wearable device, such as the accelerometer, the gyroscope, or the GNSS receiver, it could be possible to estimate other 3D kinematic parameters during the course of an event.

Supplementary Materials: The following are available online at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/s21175773/s1>, Dataset S1: Study database.

Author Contributions: Conceptualization and methodology, C.P.-C.B., J.M.P.R. and G.M.F.; validation, C.P.-C.B., M.M.-Y., S.T.V. and G.M.F.; formal analysis, C.P.-C.B., B.F.-V., M.M.-Y., S.T.V., J.M.P.R. and G.M.F.; investigation, C.P.-C.B., B.F.-V., M.M.-Y., S.T.V., J.M.P.R. and G.M.F.; resources, C.P.-C.B., J.M.P.R. and G.M.F.; data curation, C.P.-C.B., B.F.-V., J.M.P.R. and G.M.F.; writing—original draft preparation, C.P.-C.B.; writing—review and editing, J.M.P.R. and G.M.F.; visualization, C.P.-C.B., B.F.-V., M.M.-Y., S.T.V., J.M.P.R. and G.M.F.; supervision, J.M.P.R. and G.M.F.; project administration, C.P.-C.B. and G.M.F.; funding acquisition, C.P.-C.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by The Ministry of Education, Culture and Sport. The first author (C.P.-C.B.) is the recipient of a predoctoral fellowship (FPU18/04647). This paper also received the support of the National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), University of Barcelona (UB), and the Research Group of Physical Activity and Health (GRAFiS, Generalitat de Catalunya 2017SGR/741).

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki, and approved by Ethics Committee for Clinical Sport Research of Catalonia (Study Number: 27/CEICGC/2020).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: Dataset can be downloaded from <https://www.mdpi.com/article/10.3390/s21175773/s1>, Dataset S1: Study database.

Acknowledgments: The authors would like to thank the participating athletes and skiers, as well as the Chronojump-Boscosystem Association for their technical support and the AC magnets company, especially Roger Blanch, Technical Sales Director for the valuable contributions.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Haugen, T.; Tønnessen, E.; Seiler, S. 9.58 and 10.49: Nearing the citius end for 100 m? *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2015**, *10*, 269–272. [CrossRef]
- Federolf, P.A. Quantifying instantaneous performance in alpine ski racing. *J. Sports Sci.* **2012**, *30*, 1063–1068. [CrossRef]
- Supej, M.; Sætran, L.; Oggiano, L.; Ettema, G.; Šarabon, N.; Nemec, B.; Holmberg, H.C. Aerodynamic drag is not the major determinant of performance during giant slalom skiing at the elite level. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2013**, *23*, 38–47. [CrossRef] [PubMed]
- Hébert-Losier, K.; Supej, M.; Holmberg, H.C. Biomechanical factors influencing the performance of elite alpine ski racers. *Sports Med.* **2014**, *44*, 519–533. [CrossRef]
- International Ski Federation (FIS): Calendar & Results. AUDI FIS SKI WORLD CUP 2019/20 Madonna di Campiglio (ITA), 4th Men's Slalom. Official Results Run 1. Available online: <https://medias2.fis-ski.com/pdf/2020/AL/0087/2020AL0087.pdf> (accessed on 22 March 2020).
- Supej, M. Differential specific mechanical energy as a quality parameter in racing alpine skiing. *J. Appl. Biomech.* **2008**, *24*, 121–129. [CrossRef] [PubMed]
- Erdmann, W.S.; Suchanowski, A.; Aschenbrenner, P. Geometry and running of the alpine ski fis world cup giant slalom. Part one—Geometry. In Proceedings of the 18th Symposium of the International Symposium on Biomechanics in Sports, Hong Kong, China, 25–30 June 2000; pp. 637–641.
- Haugen, T.; Seiler, S.; Sandbakk, Ø.; Tønnessen, E. The training and development of elite sprint performance: An integration of scientific and best practice literature. *Sports Med.-Open* **2019**, *5*, 44. [CrossRef]
- Bret, C.; Rahmani, A.; Dufour, A.B.; Messonnier, L.; Lacour, J.R. Leg strength and stiffness as ability factors in 100 m sprint running. *J. Sports Med. Phys. Fit.* **2002**, *42*, 274–281.
- Delecluse, C.; Van Coppenolle, H.; Willems, E.; Van Leemputte, M.; Diels, R.; Goris, M. Influence of high-resistance and high-velocity training on sprint performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1995**, *27*, 1203–1209. [CrossRef]
- Supej, M.; Holmberg, H.C. Recent Kinematic and Kinetic Advances in Olympic Alpine Skiing: Pyeongchang and Beyond. *Front. Physiol.* **2019**, *10*, 111. [CrossRef] [PubMed]
- Supej, M.; Holmberg, H.C. A new time measurement method using a high-end global navigation satellite system to analyze alpine skiing. *Res. Q. Exerc. Sport* **2011**, *82*, 400–411. [CrossRef] [PubMed]
- Fasel, B.; Spörri, J.; Kröll, J.; Müller, E.; Aminian, K. A magnet-based timing system to detect gate crossings in alpine ski racing. *Sensors* **2019**, *19*, 940. [CrossRef]
- Gilgien, M.; Reid, R.; Raschner, C.; Supej, M.; Holmberg, H.C. The training of olympic alpine ski racers. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 1772. [CrossRef]
- Haugen, T.; Buchheit, M. Sprint running performance monitoring: Methodological and practical considerations. *Sport Med.* **2016**, *46*, 641–656. [CrossRef]
- International Ski Federation. *Timing-Booklet Alpine Skiing*; Version 2.59; International Ski Federation: Oberhofen, Switzerland, 2020; pp. 1–32. Available online: https://alge-timing.com/AlgeTiming_V2/files/download/Sport/FIS/Alpine-Timingbooklet-D.pdf (accessed on 12 April 2020).
- Balsalobre-Fernández, C.; Bishop, C.; Beltrán-Garrido, J.V.; Cecilia-Gallego, P.; Cuenca-Amigó, A.; Romero-Rodríguez, D.; Madruga-Parera, M. The validity and reliability of a novel app for the measurement of change of direction performance. *J. Sports Sci.* **2019**, *37*, 2420–2424. [CrossRef]
- Romero-Franco, N.; Jiménez-Reyes, P.; Castaño-Zambudio, A.; Capelo-Ramírez, F.; Rodríguez-Juan, J.J.; González-Hernández, J.; Toscano-Bendala, F.J.; Cuadrado-Peñafliel, V.; Balsalobre-Fernández, C. Sprint performance and mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference methods. *Eur. J. Sports Sci.* **2017**, *17*, 386–392. [CrossRef]
- Mann, J.B.; Ivey, P.J.; Brechue, W.F.; Mayhew, J.L. Validity and reliability of hand and electronic timing for 40-yd sprint in college football players. *J. Strength Cond. Res.* **2015**, *29*, 1509–1514. [CrossRef] [PubMed]
- Yeadon, M.R.; Kato, T.; Kerwin, D.G. Measuring running speed using photocells. *J. Sports Sci.* **1999**, *17*, 249–257. [CrossRef]

21. World Athletics. Competition Rules. 2019. Available online: <https://www.worldathletics.org/about-iaaf/documents/book-of-rules> (accessed on 13 April 2020).
22. Riu, J.M.P.; Jordán, M.Á.T. Análisis de la carrera de 100 m. de atletas paralímpicos de la categoría amputados tibiales (Oscar Pistorius). *J. Sports Train.* **2009**, *23*, 21–27.
23. Supej, M.; Hébert-Losier, K.; Holmberg, H.C. Impact of the Steepness of the Slope on the Biomechanics of World Cup Slalom Skiers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2015**, *10*, 361–368. [[CrossRef](#)]
24. Spörri, J.; Kröll, J.; Schwameder, H.; Müller, E. The role of path length- and speed-related factors for the enhancement of section performance in alpine giant slalom. *Eur. J. Sports Sci.* **2018**, *18*, 911–919. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Krüger, A.; Edlmann-Nusser, J. Application of a full body inertial measurement system in alpine skiing: A comparison with an optical video based system. *J. Appl. Biomech.* **2010**, *26*, 516–521. [[CrossRef](#)]
26. Cust, E.E.; Sweeting, A.J.; Ball, K.; Robertson, S. Machine and deep learning for sport-specific movement recognition: A systematic review of model development and performance review of model development and performance. *J. Sports Sci.* **2019**, *37*, 568–600. [[CrossRef](#)]
27. Fasel, B.; Gilgien, M.; Spörri, J.; Aminian, K. A new training assessment method for alpine ski racing: Estimating center of mass trajectory by fusing inertial sensors with periodically available position anchor points. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 1203. [[CrossRef](#)]
28. Fasel, B.; Spörri, J.; Schütz, P.; Lorenzetti, S.; Aminian, K. An inertial sensor-based method for estimating the athlete's relative joint center positions and center of mass kinematics in alpine ski racing. *Front. Physiol.* **2017**, *8*, 850. [[CrossRef](#)]
29. Burland, J.P.; Outerleys, J.B.; Lattermann, C.; Davis, I.S. Reliability of wearable sensors to assess impact metrics during sport-specific tasks. *J. Sports Sci.* **2021**, *39*, 406–411. [[CrossRef](#)]
30. Spörri, J.; Kröll, J.; Fasel, B.; Aminian, K.; Müller, E. The use of body worn sensors for detecting the vibrations acting on the lower back in alpine ski racing. *Front. Physiol.* **2017**, *8*, 522–530. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Zrenner, M.; Gradl, S.; Jensen, U.; Ullrich, M.; Eskofier, B.M. Comparison of different algorithms for calculating velocity and stride length in running using inertial measurement units. *Sensors* **2018**, *18*, 4194. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Yu, G.; Jang, Y.J.; Kim, J.; Kim, J.H.; Kim, H.Y.; Kim, K.; Panday, S.B. Potential of IMU sensors in performance analysis of professional alpine skiers. *Sensors* **2016**, *16*, 463. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Montgomery, P.G.; Pyne, D.B.; Minahan, C.L. The physical and physiological demands of basketball training and competition. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2010**, *5*, 75–86. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. International Ski Federation. *The International Ski Competition Rules (ICR) Book IV Joint Regulations for Alpine Skiing*; International Ski Federation FIS: Oberhofen, Switzerland, 2019; pp. 1–128. Available online: https://assets.fis-ski.com/image/upload/v1563960853/fis-prod/assets/ICR_July_2019_23072019.pdf (accessed on 27 August 2021).
35. Bland, J.M.; Altman, D. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* **1986**, *1*, 307–310. [[CrossRef](#)]
36. Cicchetti, D.V. Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychol. Assess.* **1994**, *6*, 284–290. [[CrossRef](#)]
37. Supej, M.; Bračič, M.; Čoh, M. The use of a high-end global navigation satellite system in a 100 m sprint. *Kinesiol. Slov.* **2010**, *16*, 14–22.
38. Fasel, B.; Spörri, J.; Gilgien, M.; Aminian, K. The fusion of magneto-inertial sensors with low-cost GNSS can improve the accuracy of determining centre of mass kinematics in alpine ski racing. In Proceedings of the 9th Annual Congress of the Swiss Society of Sports Sciences (SGS), Zürich, Switzerland, 9–10 February 2017; pp. 56–58.

4.2. Estudio 2: Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings

4.2.1. Ensayos previos

Previamente a la realización del Estudio 2 «*Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings*» se realizaron dos ensayos. El primer ensayo fue necesario para determinar cuál de los sensores del dispositivo IMU se utilizaría para delimitar las diferentes curvas de esquí de una bajada por un trazado de SL. El segundo ensayo se realizó con el objetivo de comprobar la validez del barómetro y del receptor GNSS *low-end* del dispositivo IMU para medir la altitud de cada puerta y el desnivel entre las puertas de un trazado de SL.

Análisis de la viabilidad de diferentes sensores incorporados en el dispositivo IMU para detectar y delimitar las curvas de esquí

Este ensayo precede al estudio 2 *Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings*. Para realizar el estudio fue necesario valorar cuál de los sensores del dispositivo IMU se utilizaría para delimitar las diferentes curvas de esquí de una bajada por un trazado de SL.

Introducción

Las características específicas de cada curva y de sus fases definirán el resultado de la carrera de esquí (6,19). Para poder estudiar la estructura de la curva es imprescindible definir con precisión el momento en que comienza y termina dicha curva. Este momento se denomina «punto de cambio de curva» o, en inglés, *turn switch point* (TS) y se utiliza para delimitar curvas consecutivas.

La detección del TS ha sido un tema de interés durante más de 30 años en el ámbito de la investigación en el esquí (24,26,27,43,139). A pesar de ello, hay poco acuerdo en cuanto a los métodos que deben utilizarse para detectar el TS. En 2003, Supej *et al.* (24), a partir de criterios cinemáticos obtenidos con sistemas de fotogrametría a través de videograbación, definieron el TS como el punto de intersección entre la trayectoria del CdM del esquiador proyectada sobre la superficie de la nieve y la trayectoria promedio de ambos esquís. Este ha sido el punto TS utilizado como referencia en la literatura para delimitar curvas consecutivas (6,19,22).

Sin embargo, la complicación de las mediciones con sistemas de grabación de vídeo en un entorno natural, así como el reducido número de curvas que

pueden analizarse y el extenso tiempo de postprocesamiento de la información, dificultan la recogida de datos de forma regular.

Estudios posteriores con sistemas *wearable*, como los dispositivos IMU, han demostrado poder detectar el TS. En esta línea se ha comprobado que el TS puede detectarse con el uso de un solo IMU a través de la inclinación de la pelvis (46), de la velocidad angular de la bota (25) o de datos basados en la aceleración lateral del tronco (48). En este ensayo se analizaron las curvas de esquí a partir de estos tres métodos descritos en la literatura. El objetivo fue determinar cuál de los sensores incorporados en el dispositivo IMU era más adecuado para delimitar las curvas en el estudio 2.

Material y métodos

Este ensayo se realizó a partir de los registros de cinco esquiadores alpinos de élite ($21,2 \pm 3,3$ años, $180,2 \pm 5,6$ cm, $72,8 \pm 6,6$ kg, $39,6 \pm 7,6$ puntos FIS de SL). Los esquiadores tenían colocado un dispositivo IMU en la zona baja de la espalda (L4-L5) y realizaron una bajada cada uno por un trazado de SL de 15 puertas. La pendiente media del trazado fue de 13° (23,1%). El trazado se realizó con la supervisión de los técnicos, siguiendo las indicaciones de la FIS (11). Para poder determinar el momento de paso por las diferentes puertas, se utilizó el M-BTS (127). De la puerta 4 a la puerta 13 se enterraron las barras magnéticas de 33 mm de diámetro y 267 mm de altura (D33 mm x 267 mm, ND35, A.C. magnets 98, Barcelona, Espanya).

Se analizaron las 5 bajadas (40 curvas) que realizaron los esquiadores. Para delimitar las curvas se siguieron las indicaciones de los métodos propuestos por Yu *et al.* (46), Martínez *et al.* (28) y Yamagiwa *et al.* (48) con alguna ligera modificación. Todos estos métodos se basan en la modelización tradicional del movimiento del esquiador como un péndulo invertido (53,95,96,139,140) (figura 33). Esta modelización se basa en la suposición

de que la posición neutra del péndulo se produce durante el momento de transición entre curvas consecutivas. En consecuencia se correspondería con el instante de cero ángulo de balanceo con respecto a la vertical (46), de máxima velocidad angular en el ángulo de balanceo (28) y de cero aceleración lateral (48). A continuación se detallan los métodos y los sensores del dispositivo IMU que se utilizaron.

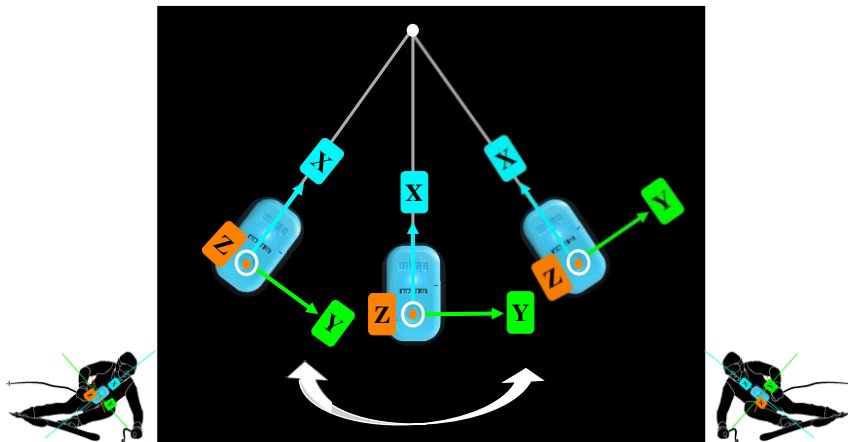


Figura 33. Modelización del movimiento del esquiador como un péndulo invertido. Definición de los ejes de movimiento para el dispositivo IMU orientado verticalmente. El eje x está alineado con el eje longitudinal del péndulo, el eje y es perpendicular al eje de rotación del péndulo y al eje longitudinal del mismo, y el eje z está alineado con el eje de rotación del péndulo.

Delimitación de las curvas a partir de la inclinación de la pelvis

En primer lugar, para detectar los TS de las curvas consecutivas a lo largo de las bajadas se siguieron las indicaciones del método propuesto por Yu *et al.* (46). El dispositivo IMU utiliza la información del acelerómetro, el giroscopio y el magnetómetro para calcular los cuaterniones unitarios, que posteriormente se transforman en ángulos de Euler (Euler X, Euler Y, Euler Z). Estos ángulos realizan la función de un goniómetro (141).

Para cada bajada se utilizó el registro con los datos crudos de Euler Y (plano frontal; eje z) para medir la inclinación de la pelvis, es decir, el ángulo de balanceo de la pelvis del esquiador con respecto a la vertical. Este ángulo de balanceo es fruto de las inclinaciones laterales del esquiador hacia el interior de la curva (modelización del péndulo invertido) (figura 33). El momento de ángulo de balanceo cero se corresponde con el TS, de manera que una curva se define como el intervalo entre dos ceros (figura 34 a).

Se utilizó la herramienta de detección de ciclos del *software* SPRO (Realtrack Systems, Almería, España). Esta se configuró manualmente para detectar los ciclos de entre 200 y 2000 ms que se correspondían con las curvas de esquí. De esta manera se detectaron automáticamente los puntos de corte con el cero y los tiempos de cada curva. Un valor negativo del balanceo indicaba que el esquiador se estaba inclinando hacia la derecha (curva a la derecha) y un valor positivo indicaba que el esquiador se estaba inclinando hacia la izquierda (curva a la izquierda).

Delimitación de las curvas a partir de la velocidad angular de la pelvis

En segundo lugar, se siguieron las indicaciones del método propuesto por Martínez *et al.* (25) para delimitar los TS de las curvas. Sin embargo, a diferencia de ellos, en la presente tesis no colocamos el dispositivo IMU en la bota sino en la zona baja de la espalda de los esquiadores, a nivel de la pelvis, entre L4-L5. Esta colocación, cercana al CdM, se eligió como la mejor ubicación para evaluar el movimiento de todo el cuerpo y detectar los TS de las curvas de esquí (46,142). Por lo tanto, se intentó seguir la metodología propuesta por Martínez *et al.*, pero, en vez de delimitar las curvas a partir de la velocidad angular de la bota, se definieron a partir de la velocidad angular de la pelvis.

Para cada bajada, la señal del giroscopio correspondiente al eje z (anteroposterior) fue filtrado con un filtro paso bajo de 4º orden Butterworth con una frecuencia de corte de 0,5 Hz (25). Cuando hay una inclinación del esquiador, se produce una rotación sobre este eje que puede medirse en velocidad angular. El momento de máxima velocidad angular se corresponde con el TS. De esta manera, la curva queda delimitada por dos picos de máxima velocidad angular (figura 34 b). Se utilizó la herramienta de detección de picos del *software* SPRO. Esta se configuró manualmente para detectar los picos de velocidad angular máximos y mínimos consecutivos con una separación mayor de 200 ms y menor de 2000 ms. Los picos y los tiempos entre picos, que se correspondían a los tiempos de cada curva, se detectaron automáticamente.

Delimitación de las curvas a partir de la aceleración lateral de la pelvis

Finalmente, se siguieron las indicaciones del método propuesto por Yamagiwa *et al.* (48) para delimitar los puntos TS de las curvas. En su estudio, el dispositivo IMU se colocó en la zona alta de la espalda. En cambio, en la presente tesis, el dispositivo IMU se colocó en la zona baja de la espalda. Para cada bajada, la señal de aceleración correspondiente al eje y (lateral) fue filtrada con un filtro paso bajo de 4º orden Butterworth con una frecuencia de corte de 6 Hz. Este filtro se eligió para mantener el 95 % de la potencia de la señal (143).

Yamagiwa *et al.* (48) identificaron que el momento de cero aceleración lateral se corresponde con el TS. En este ensayo, en cambio, se observó que no había un único momento donde la aceleración lateral tuviera valor cero, sino que fluctuaba en torno al valor cero durante un cierto periodo de tiempo. Así pues, se identificaron dos fases principales dentro de la curva de esquí que se denominaron fase de inicio (fase INI) y fase de conducción (fase STE) (figura 34 c).

La fase INI se limitó a la zona en la que la aceleración fluctuaba en torno al valor cero correspondiente al movimiento entre curvas. En esta fase, el esquiador se encuentra prácticamente con el CdM proyectado sobre los esquís, por lo que no existe una inclinación lateral del esquiador que produzca un aumento de la aceleración recogida por el eje y debido a la gravedad.

Por el contrario, la fase STE se limitó a las zonas en las que la aceleración se alejaba del eje cero, alcanzaba su pico máximo y se acercaba de nuevo al eje cero. Esta fase se correspondía con el sistema esquiador esqui moviéndose a lo largo de una trayectoria curvilínea con una fuerza centrífuga actuando sobre él y, por tanto, donde la aceleración lateral está presente.

A continuación se exportaron los registros de cada bajada a Microsoft Excel y se programó una rutina en MATLAB (The MathWorks, Natick, MA, EE. UU.) para separar cada curva en sus dos fases principales. La rutina se programó para detectar los picos máximos y mínimos de aceleración y los puntos de corte con el cero de la señal de aceleración más cercanos a cada lado del pico, que corresponden a la fase STE. La fase INI quedaba delimitada entre las fases STE de dos curvas consecutivas. Se pudieron identificar las curvas a la derecha y a la izquierda. Los picos positivos correspondían a las curvas a la derecha, y los negativos, a las curvas a la izquierda (véase estudio 2, figura 3).

Resultados

En la figura 34 se muestra una de las bajadas analizadas correspondiente a un esquiador. Tal y como se puede observar, se han determinado los puntos TS de las diferentes curvas de la bajada siguiendo los métodos descritos por Yu *et al.* (46), Martínez *et al.* (28) y Yamagiwa *et al.* (48).

En una primera inspección visual, se aprecia que los puntos TS obtenidos por los tres métodos no coinciden en la escala temporal. El método propuesto por Yu *et al.* (46), es el único que es indirecto ya que la inclinación en grados de la pelvis se obtiene aplicando algoritmos de la combinación de diferentes sensores del dispositivo IMU. Por lo tanto, este se descartó. En cambio, los métodos propuestos por Martínez *et al.* (28) y Yamagiwa *et al.* (48), son métodos directos donde la señal cruda que reporta el sensor es la variable que se quiere estudiar. Comparando con más detalle estos dos métodos, se aprecia que, si hay una correspondencia entre los TS definidos a partir de los picos de velocidad angular y el momento en que se produce el cambio de fase INI a fase STE, determinado a través de la aceleración. Visualmente se aprecia que la señal de la aceleración nos da más información ya que permite dividir la curva en diferentes fases que podrían ser determinantes para explicar el rendimiento de un esquiador en un SL.

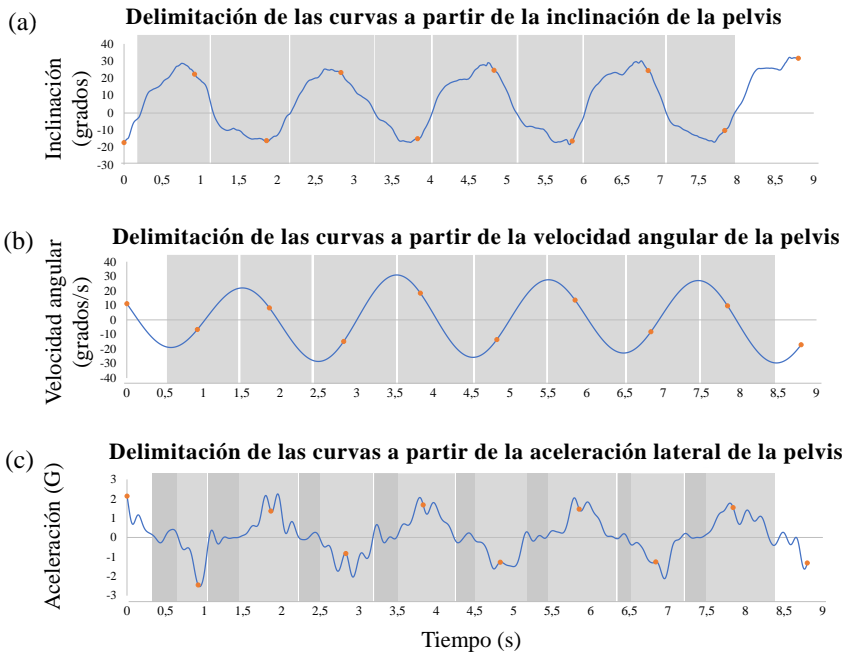


Figura 34. Registros de una bajada de un esquiador por un trazado de SL. Los círculos naranjas representan las puertas y los cuadros grises representan las ocho curvas completas, delimitadas según cada sensor. Con la señal de aceleración lateral se distinguen la fase INI (cuadros grises oscuros) y la fase STE (cuadros grises suaves) de las curvas de esquí.

Discusión y conclusiones

En este ensayo se quiso analizar la viabilidad de diferentes sensores incorporados en el dispositivo IMU para delimitar la curva de esquí. Por ello, se siguieron las indicaciones de los métodos propuestos por Yu *et al.* (46), Martínez *et al.* (28) y Yamagiwa *et al.* (48), y se delimitaron las curvas a partir de la inclinación lateral de la pelvis, la velocidad angular de la pelvis y la aceleración lateral de la pelvis, respectivamente. Todos estos métodos se basan en la modelización tradicional del movimiento del esquiador como un péndulo invertido (53,95,96,139,140).

A partir de la inspección visual de los resultados, se descartó el método propuesto por Yu *et al.* (46), ya que no se observó una correspondencia clara con los otros dos métodos, seguramente debido al hecho que era el único método indirecto. Entre los métodos directos propuestos por Martínez *et al.* (28) y Yamagiwa *et al.* (48), sí que existía una correspondencia temporal, siendo la señal de aceleración la que nos permitió obtener información no solo de los puntos TS, sino también de las diferentes fases dentro de la curva de esquí.

Cabe destacar que, paralelamente a la realización de este ensayo, se publicó en la literatura un estudio de validación sobre los diferentes métodos para determinar los TS de las curvas (26), entre ellos, los propuestos en este ensayo. En dicho estudio, los diferentes métodos se compararon con el método de referencia propuesto por Supej *et al.* (24), determinado mediante un sistema de análisis optoelectrónico. Concluyeron que, entre las metodologías basadas en el concepto de péndulo invertido, la delimitación de las curvas a partir de la velocidad angular de la bota (28) y de la aceleración lateral del tronco (48) fueron las que obtuvieron mayor exactitud y precisión. Además, no requerían de correcciones de deriva ni otros pasos de procesamiento, con lo que se facilitaba su uso.

En este ensayo, se descartó el método de Martínez *et al.* (28), ya que fue validado para el dispositivo IMU colocado en la bota de esquí (25,26) y no para su colocación en la pelvis.

Finalmente, se eligió delimitar las curvas a partir de la aceleración lateral de la pelvis (figura 34 c). Sin embargo, se utilizó un acelerómetro con una frecuencia de muestreo cinco veces mayor que el que se había utilizado en el estudio realizado por Yamagiwa *et al.* (48), lo que permitió diferenciar claramente las fases principales de la curva: INI y STE.

4. Estudios

En un inicio solamente se había planteado dividir las curvas según el momento de paso por la puerta determinado a través del M-BTS (127), pero, al elegir este método, se ampliaron las posibilidades de análisis de la estructura de la curva de esquí y se pudieron diferenciar las siguientes fases: INI, conducción de entrada a la curva (STE_{IN}), conducción de salida de la curva (STE_{OUT}) y STE, en adelante (STE_{IN+OUT}) (figura 35).

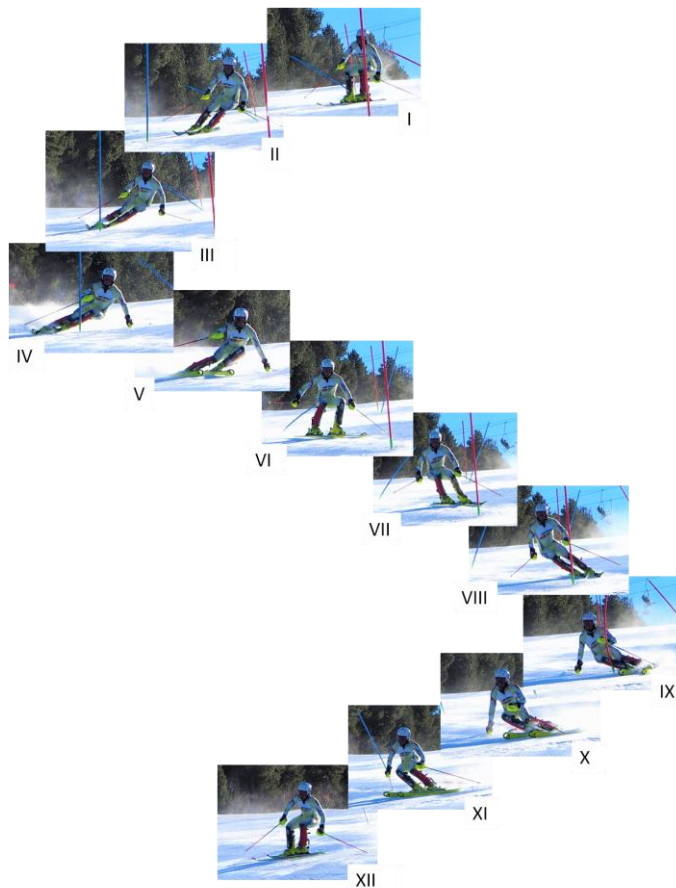


Figura 35. Representación de dos curvas consecutivas de SL; la primera, con pie exterior derecho, y la segunda, con pie exterior izquierdo. La primera curva se divide en una fase INI (I) y una fase STE (II-V). La segunda curva se divide en una fase INI (VI) y una fase STE (VII-XI). A su vez, la fase STE se divide en una fase STE_{IN} (II-III para la curva 1 y VII-VIII para la curva 2) y una fase STE_{OUT} (V para la curva 1 y X-XI para la curva 2).

Hasta la fecha no se había publicado ningún estudio donde se delimitarían las fases de la curva de esquí con el acelerómetro de un dispositivo IMU. Este ensayo sirvió para poder delimitar las curvas y sus fases en el estudio 2 de esta tesis (*Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings*).

Validez del barómetro y del receptor GNSS low-end de un dispositivo IMU para determinar la altitud de cada puerta y el desnivel entre las puertas de un trazado de SL

Este ensayo también precede al estudio *2 Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings*. Para realizar el estudio fue necesario elegir con qué sistema se realizarían la caracterización del terreno y los trazados que se querían estudiar. Por este motivo, se quiso valorar si con el barómetro y el receptor GNSS *low-end* del dispositivo IMU utilizado se podía determinar la altitud de cada puerta y el desnivel entre las puertas de un trazado de SL.

Introducción

Una de las maneras de determinar la pendiente de los trazados es a partir del desnivel de dicho trazado. El desnivel del trazado es la suma de los desniveles entre las puertas de dicho trazado. En la literatura científica se han utilizado varios métodos topográficos, como los teodolitos, los taquímetros o los sistemas GNSS diferenciales de alta gama (*dGNSS high-end*), para obtener la posición de las puertas y reconstruir la geomorfología del terreno donde está situado el trazado (6,9,67).

El dispositivo IMU lleva incorporados un receptor GNSS *low-end* y un barómetro con el que es posible obtener los datos referentes a la altitud. En este ensayo el objetivo fue comprobar la validez de estos instrumentos tanto para medir la altitud de cada puerta como para determinar el desnivel entre puertas con una precisión suficiente como para utilizarlo para caracterizar un trazado de SL, donde el desnivel entre puertas oscila entre 2 y 4 m. Además, con el desarrollo del M-BTS, que permite conocer el momento en

que el esquiador pasa por las puertas de un trazado mientras desciende por él, se quiso validar el GNSS *low-end* y el barómetro del IMU en situación dinámica.

Material y métodos

Participante

En este ensayo, el participante fue un esquiador alpino de categoría máster que compite regularmente en los campeonatos del mundo de la FIS (31 años, 180 cm, 75 kg, 43,48 puntos FIS de SL). Se obtuvo el consentimiento informado por escrito del participante. Todos los procedimientos fueron aprobados por el Comité Ético de Investigación Clínica del Deporte de Cataluña (número de estudio 27/CEICGC/2020) y se realizaron de acuerdo con la Declaración de Helsinki.

Dispositivo IMU y colocación

Se utilizó un dispositivo IMU (WIMU, Realtrack Systems, Almería, España). Concretamente, se utilizaron las señales del GNSS *low-end* (frecuencia de muestreo: 10 Hz), del barómetro (frecuencia de muestreo: 100 Hz) y del magnetómetro (frecuencia de muestreo: 100 Hz). El IMU se fijó en la zona baja de la espalda del esquiador. Antes de las mediciones se realizó la calibración del dispositivo en una superficie plana y uniforme según las especificaciones del fabricante.

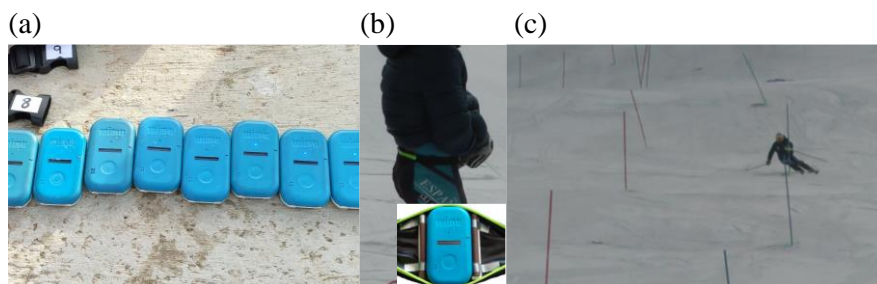


Figura 36. (a) Calibración de los dispositivos IMU en una superficie llana y uniforme. (b) Colocación del dispositivo IMU en la zona baja de la espalda del esquiador. (c) Esquiador realiza una bajada por el trazado con el dispositivo IMU.

Configuración del trazado

Con la supervisión de dos técnicos se realizó el marcaje de un trazado de SL de 26 puertas. El trazado tenía dos secciones claramente diferenciadas por su pendiente, que fue analizada con el dGNSS *high-end*. La sección que tenía la pendiente más pronunciada estaba entre las puertas 7 y 14, y tenía una inclinación media de $20,5^\circ$ (37,4 %). La sección de pendiente más suave estaba entre las puertas 18 y 25, y tenía una inclinación media de $15,4^\circ$ (27,5 %). Las 8 puertas de cada sección eran equidistantes verticalmente (la pendiente pronunciada, $10,83 \pm 0,47$ m, y la más suave, $10,92 \pm 0,14$ m) y horizontalmente ($3,98 \pm 0,48$ m y $4,13 \pm 0,15$ m, respectivamente). Todas las distancias entre puertas cumplían las normas de la FIS (11). En las 16 puertas analizadas se colocaron barras magnéticas enterradas en la superficie de la nieve (D33 mm \times 267 mm, ND35, A. C. Magnets 98, Barcelona, España).

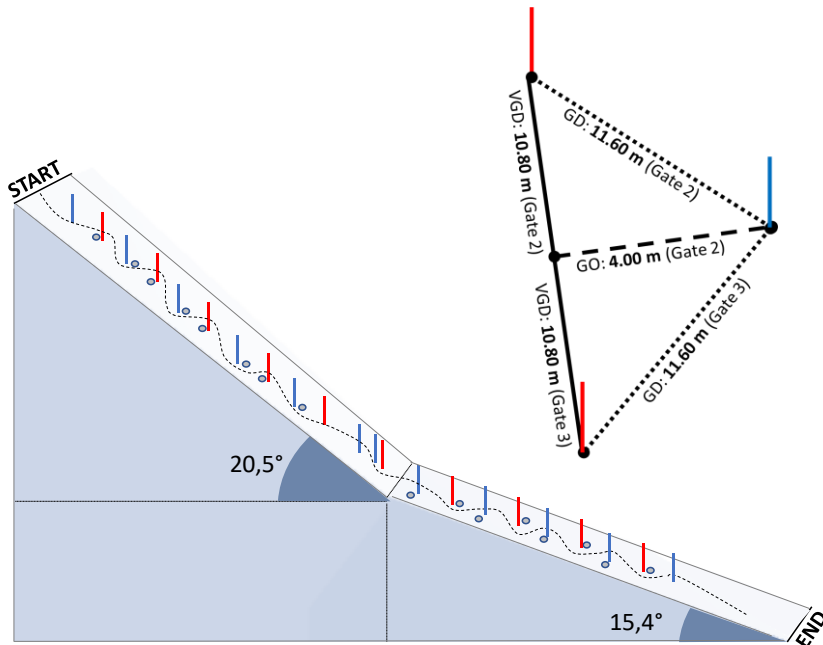


Figura 37. A la izquierda, ilustración esquemática de las dos secciones del trazado de SL analizadas. A la derecha, ilustración de las características del trazado con la distancia entre puertas (GD), la distancia vertical (VGD) y la distancia horizontal (GO).

Procedimientos

Mediciones con el dispositivo IMU

Las mediciones de altitud obtenidas con la utilización del dispositivo IMU (GNSS *low-end* y barómetro) se tomaron en situación dinámica mientras el esquiador realizaba las bajadas por el trazado. El esquiador realizó un total de cuatro bajadas por el trazado. La primera y la tercera bajada se registraron con un dispositivo IMU (IMU 1), y la segunda y la cuarta se registraron con otro dispositivo IMU (IMU 2). Ambos dispositivos eran idénticos en cuanto a sus características, pero se quiso probar si entre ellos se presentarían diferencias. Todos los datos quedaron almacenados en

ambos dispositivos y se descargaron *a posteriori* con el *software* SPRO (RealTrack Systems, Almería, España).

Gracias a la utilización del M-BTS, descrito en Pérez-Chirinos Buxadé *et al.* (127), se pudieron obtener los picos en la señal del magnetómetro del IMU que indicaban el momento de paso por las diferentes puertas. Como todos los dispositivos incorporados en el IMU están sincronizados bajo la misma escala temporal, se seleccionaron los datos referentes a la altitud registrados por el GNSS *low-end* y por el barómetro en el momento del paso por las diferentes puertas del trazado. Debido a la baja frecuencia del GNSS *low-end*, se interpelaron los datos para tener el mismo número de datos que el barómetro y el magnetómetro.

Mediciones con el dGNSS *high-end*

Finalmente, las posiciones de referencia de todas las puertas del trazado se midieron utilizando un dGNSS *high-end* Leica GS18 T RTK (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suiza) en situación estática, es decir, se realizó una parada de entre 10 y 20 segundos en cada puerta para tomar la medición de la altitud. Se montó la antena dGNSS sobre un poste de 2 m de longitud. La posición se tomó en la punta del poste. La punta del poste se situó exactamente en la marca que había dejado la puerta al insertarse en la nieve (figura 38). Se utilizó un método de procesamiento diferencial que calculaba las coordenadas de posición y el error de medida de la posición en tiempo real.

Durante la mañana de recogida de datos, la temperatura del aire fue de 15 ± 2 °C, la humedad relativa del 67 ± 3 %, había un cielo despejado con buena visibilidad y con una excelente PDOP de $0,71 \pm 0,03$.



Figura 38. Medición de la posición de una puerta del trazado con el dGNSS *high-end* en situación estática por Dani Gavaldà Castet

Estadística

En primer lugar, se utilizó el test U de Mann-Whitney para medir si existían diferencias entre los dos dispositivos IMU utilizados (IMU 1 vs. IMU 2). En segundo lugar, se compararon los diferentes instrumentos (dGNSS *high-end* vs. GNSS *low-end* y dGNSS *high-end* vs. barómetro), también mediante el test U de Mann-Whitney.

Resultados

Tal y como se puede observar en la tabla 2, se realizaron medidas con dos dispositivos IMU (IMU 1 e IMU 2) y se registraron cuatro bajadas en total, dos bajadas con cada dispositivo.

En primer lugar, se muestran los datos crudos de altitud obtenidos con la utilización del dGNSS *high-end* y del dispositivo IMU (GNSS *low-end* y barómetro). El análisis se hizo para dos secciones diferenciadas del trazado (pendiente pronunciada de 20,5° y pendiente suave de 15,4°). Las medidas de altitud se realizaron en cada puerta del trazado (puerta 7- puerta 14 para la sección de pendiente pronunciada, y puerta 18- puerta 25 para la sección de pendiente suave). En total se obtuvo la altitud de 16 puertas del trazado.

En segundo lugar, se muestran los datos de desnivel. El desnivel se calculó mediante la diferencia de las altitudes entre puertas consecutivas. A modo de ejemplo, el desnivel 1 (VD1) es la diferencia entre la puerta 7 (G7) y la puerta 8 (G8); el desnivel 2 (VD2) es la diferencia entre la puerta 8 (G8) y la puerta 9 (G9), y así sucesivamente. En total se obtuvieron 14 desniveles, siete para cada sección del trazado.

Tabla 2. Datos de la altitud de cada puerta y del desnivel entre puertas para las cuatro bajadas analizadas

		dGNSS	GNSS low-end				Barómetro			
		<i>high-end</i>	IMU 1		IMU 2		IMU 1		IMU 2	
			Bajada 1	Bajada 3	Bajada 2	Bajada 4	Bajada 1	Bajada 3	Bajada 2	Bajada 4
Pendiente 20,5°	Altitud (m)									
	G7	1926,976	1932,511	1925,727	1933,066	1927,350	2013,270	2011,741	1915,875	1919,019
	G8	1923,043	1928,942	1922,011	1928,835	1923,783	2008,873	2009,476	1910,971	1916,567
	G9	1919,693	1925,652	1918,931	1925,918	1920,586	2004,206	2005,519	1906,000	1911,315
	G10	1915,605	1921,130	1914,782	1921,128	1916,568	2001,190	2000,781	1904,949	1907,997
	G11	1911,899	1917,328	1911,379	1917,403	1912,817	1996,390	1994,294	1899,097	1901,556
	G12	1907,299	1912,171	1906,811	1912,525	1908,048	1991,149	1991,208	1893,747	1898,432
	G13	1903,868	1908,916	1903,615	1909,605	1904,559	1986,747	1987,836	1889,645	1893,881
G14	1900,222	1905,277	1900,029	1905,382	1900,847	1984,711	1985,150	1886,655	1891,954	
Pendiente 15,4°	G18	1893,152	1898,582	1892,866	1897,608	1893,028	1976,089	1977,269	1878,581	1884,850
	G19	1889,623	1895,189	1889,367	1893,782	1889,562	1972,379	1970,666	1876,205	1878,616
	G20	1886,767	1892,560	1886,494	1891,401	1887,047	1968,827	1969,362	1871,810	1876,249
	G21	1884,271	1890,334	1884,188	1888,708	1884,484	1965,204	1966,368	1869,678	1873,466
	G22	1881,150	1887,074	1880,872	1885,610	1880,844	1961,014	1963,076	1865,123	1868,968
	G23	1878,365	1884,363	1878,306	1882,576	1877,724	1958,399	1959,218	1861,990	1867,229
	G24	1875,453	1881,004	1875,580	1880,092	1874,721	1954,434	1955,866	1860,109	1862,426
	G25	1872,863	1878,070	1873,460	1877,215	1872,487	1953,273	1955,489	1859,009	1861,424

Desnivel (m)		dGNSS	GNSS low-end				Barómetro			
		<i>high-end</i>	IMU 1		IMU 2		IMU 1		IMU 2	
			Bajada 1	Bajada 3	Bajada 2	Bajada 4	Bajada 1	Bajada 3	Bajada 2	Bajada 4
Pendiente 20,5°	VD1	3,933	3,569	3,715	4,231	3,567	4,397	2,265	4,903	2,452
	VD2	3,350	3,290	3,080	2,916	3,197	4,666	3,957	4,971	5,252
	VD3	4,088	4,521	4,149	4,791	4,018	3,016	4,739	1,051	3,319
	VD4	3,706	3,803	3,403	3,725	3,751	4,800	6,487	5,852	6,441
	VD5	4,600	5,157	4,568	4,878	4,768	5,241	3,085	5,350	3,123
	VD6	3,431	3,255	3,196	2,921	3,489	4,402	3,373	4,102	4,552
	VD7	3,646	3,639	3,587	4,223	3,713	2,036	2,685	2,990	1,927
Pendiente 15,4°	VD8	3,529	3,393	3,499	3,825	3,466	3,709	6,603	2,376	6,234
	VD9	2,856	2,629	2,873	2,382	2,515	3,552	1,304	4,395	2,367
	VD10	2,496	2,226	2,306	2,693	2,564	3,623	2,994	2,132	2,784
	VD11	3,121	3,261	3,315	3,097	3,639	4,189	3,292	4,556	4,498
	VD12	2,785	2,711	2,566	3,035	3,120	2,615	3,858	3,132	1,739
	VD13	2,912	3,359	2,726	2,484	3,003	3,965	3,352	1,881	4,803
	VD14	2,590	2,934	2,120	2,877	2,234	1,161	0,377	1,100	1,002

G, puerta; VD, desnivel

Se realizó un primer análisis para observar si existían diferencias *inter* dispositivo, tanto para las medidas de altitud como para las de desnivel (tabla 3). La estadística se realizó con el promedio de las medidas tomadas por un mismo dispositivo IMU.

En primer lugar, se compara la mediana de las altitudes [primer cuartil; tercer cuartil] entre los dos IMU para cada sección del trazado. Las altitudes medidas por el GNSS *low-end* se pueden considerar iguales en los dos IMU para las dos pendientes (pendiente 20,5°: $W = 28$, $p = 0,721$; pendiente 15,4°: $W = 36$, $p = 0,721$). No obstante, la altitud medida mediante barómetro es significativamente diferente entre ambos IMU ($W = 64$, $p = 0,0002$). El IMU 1 reportó valores significativamente más elevados en ambas pendientes.

En segundo lugar, se compara la mediana de los desniveles [primer cuartil; tercer cuartil] entre los dos IMU para cada sección del trazado. En las dos pendientes, los desniveles medidos por el GNSS *low-end* de cada dispositivo IMU se pueden considerar iguales (pendiente 20,5°: $W = 21$, $p = 0,710$; pendiente 15,4°: $W = 23$, $p = 0,902$), y lo mismo en cuanto al barómetro (pendiente 20,5°: $W = 22$, $p = 0,805$; pendiente 15,4°: $W = 24$, $p = 1$).

Tabla 3. Comparación *inter* dispositivo

Altitud (m)	GNSS <i>low-end</i>				Barómetro			
	IMU 1	IMU 2	U de Mann-Whitney W	p.overall	IMU 1	IMU 2	U de Mann-Whitney W	p.overall
Pendiente 20,5°	1916,15 [1908,68;1923,09]	1916,98 [1909,49;1924,02]	28	0,721	1998,16 [1990,21;2005,94]	1903,40 [1895,01;1909,94]	64	0,0002
Pendiente 15,4°	1885,62 [1880,57;1890,21]	1884,91 [1879,46;1889,84]	36	0,721	1963,92 [1957,89;1969,70]	1869,31 [1863,77;1874,87]	64	0,0002
Desnivel (m)								
Pendiente 20,5°	3,61 [3,41;3,99]	3,90 [3,47;4,19]	21	0,710	3,89 [3,60;4,24]	4,24 [3,07;4,72]	22	0,805
Pendiente 15,4°	2,75 [2,58;3,17]	2,74 [2,59;3,22]	23	0,902	3,31 [2,83;3,70]	3,34 [2,45;3,84]	24	1,000

p, nivel de significación.

Finalmente, se compararon los siguientes instrumentos: el dGNSS *high-end* vs. el GNSS *low-end* (tabla 4), y el dGNSS *high-end* vs. el barómetro (tabla 5), tanto para las medidas de altitud como para las de desnivel. Para eliminar el efecto IMU (que se ha observado en las medidas del barómetro, pero no en las medidas del GNSS *low-end*) se trabaja con el promedio de los datos por IMU. Esto hace que solo se disponga de ocho observaciones por cada pendiente.

En la tabla 4 se muestra que no hay diferencias entre las medidas de altitud proporcionadas por el dGNSS *high-end* y las medidas proporcionadas por el GNSS *low-end*, ni en la pendiente pronunciada ($W = 28, p = 0,721$) ni en la pendiente suave ($W = 27, p = 0,645$). Tampoco existen diferencias entre los valores de desnivel proporcionadas por ambos instrumentos en ninguna de las pendientes ($W = 25, p = 1$).

Contrariamente, las altitudes medidas por el barómetro sí difieren de las altitudes medidas por el dGNSS *high-end* en ambas pendientes (pendiente pronunciada: $W = 0, p < 0,001$; pendiente suave: $W = 0, p < 0,001$). En concreto, la altitud medida por el dGNSS *high-end* es bastante inferior a la altitud medida por barómetro (tabla 5). En cambio, no existen diferencias en los valores de desnivel entre el dGNSS *high-end* y el barómetro en la pendiente pronunciada ($W = 21, p = 0,7104$) ni en la pendiente suave ($W = 18, p = 0,4557$) (tabla 5).

Tabla 4. Comparación de las altitudes y desniveles entre el dGNSS *high-end* y el GNSS *low-end*

Altitud (m)	dGNSS <i>high-end</i>				GNSS <i>low-end</i>				U de Mann-Whitney	
	Promedio \pm SD	Mediana	Min	Max	Promedio \pm SD	Mediana	Min	Max	W	p-value
Pendiente 20,5°	1913,576 \pm 9,453	1913,752	1900,222	1926,976	1916,363 \pm 9,510	1916,57	1902,88	1929,66	28	0,721
Pendiente 15,4°	1882,706 \pm 7,037	1882,711	1872,863	1893,152	1885,162 \pm 7,042	1885,26	1875,31	1895,52	27	0,645
Desnivel (m)										
Pendiente 20,5°	3,822 \pm 0,430	3,706	3,350	4,600	3,826 \pm 0,609	3,771	3,121	4,842	25	1,000
Pendiente 15,4°	2,898 \pm 0,346	2,856	2,496	3,529	2,888 \pm 0,413	2,858	2,447	3,546	25	1,000

Min, mínimo; Max, máximo; *p*, nivel de significación.

Tabla 5. Comparación de las altitudes y desniveles entre el dGNSS *high-end* y el barómetro

Altitud (m)	dGNSS <i>high-end</i>				Barómetro				U de Mann-Whitney	
	Promedio \pm SD	Mediana	Min	Max	Promedio \pm SD	Mediana	Min	Max	W	p-value
Pendiente 20,5°	1913,576 \pm 9,453	1913,752	1900,222	1926,976	1950,631 \pm 10,234	1950,78	1937,12	1964,98	0	<0,001
Pendiente 15,4°	1882,706 \pm 7,037	1882,711	1872,863	1893,152	1916,958 \pm 7,870	1916,61	1907,3	1929,2	0	<0,001
Desnivel (m)										
Pendiente 20,5°	3,822 \pm 0,430	3,706	3,35	4,6	3,980 \pm 1,144	4,107	2,41	5,895	21	0,710
Pendiente 15,4°	2,898 \pm 0,346	2,856	2,496	3,529	3,128 \pm 1,213	2,904	0,91	4,731	18	0,456

Min, mínimo; Max, máximo; *p*, nivel de significación.

En el caso del desnivel, las diferencias observadas no son suficientemente grandes para encontrar una diferencia significativa con solo siete datos. Sin embargo, cuando se trabaja con las diferencias relativas en valor absoluto se puede apreciar la magnitud de dichas diferencias.

En la tabla 6 se muestran las diferencias relativas entre instrumentos para las medidas de altitud y de desnivel. Para el análisis se toma el promedio de las medidas de los dispositivos IMU, ya que se ha observado que los dos IMU son equivalentes con excepción de las medidas de altitud del barómetro. En este caso se ha preferido también trabajar con el promedio que decantarse por un IMU concreto o complicar el modelo introduciendo el factor IMU (contradiendo así el criterio de parsimonia). Las diferencias relativas en valor absoluto se han calculado para el GNSS *low-end* y para el barómetro en relación con la medición de referencia del dGNSS *high-end*, y se han expresado tanto en porcentaje como en metros.

Visualmente se hacen evidentes las diferencias entre instrumentos. En el caso de las medidas de altitud, la diferencia relativa entre el dGNSS *high-end* y el GNSS *low-end* oscila entre el 0,12 y 0,16 %, lo que representa unos errores de entre 2,3 y 3,1 m para las altitudes analizadas. En el caso del barómetro, todavía se comprometen más las medidas de altitud, con unas diferencias que oscilan entre el 1,75 y el 2 %, lo que representa unos errores de más de 30 m. Ambas pendientes analizadas han mostrado resultados muy similares.

Tabla 6. Diferencias relativas entre el dGNSS *high-end* y el GNSS *low-end*, y el dGNSS *high-end* y el barómetro

Altitud (m)	dGNSS <i>high-end</i>	GNSS <i>low-end</i>		Barómetro		Diferencia Relativa dGNSS <i>high-end</i> GNSS <i>low-end</i>		Diferencia Relativa dGNSS <i>high-end</i> Barómetro	
		Promedio IMUs \pm SD		Promedio IMUs \pm SD		(%)	(m)	(%)	(m)
Pendiente 20,5°	G7	1926,976	1929,663 \pm 0,770	1964,976 \pm 67,217	0,14%	2,698	1,97%	37,961	
	G8	1923,043	1925,893 \pm 0,589	1961,472 \pm 67,462	0,15%	2,885	2,00%	38,461	
	G9	1919,693	1922,772 \pm 0,679	1956,760 \pm 68,027	0,16%	3,072	1,93%	37,050	
	G10	1915,605	1918,402 \pm 0,630	1953,729 \pm 66,830	0,15%	2,873	1,99%	38,121	
	G11	1911,899	1914,731 \pm 0,535	1947,834 \pm 67,186	0,15%	2,868	1,88%	35,944	
	G12	1907,299	1909,889 \pm 0,563	1943,634 \pm 67,238	0,14%	2,670	1,91%	36,429	
	G13	1903,868	1906,674 \pm 0,577	1939,527 \pm 67,549	0,15%	2,856	1,87%	35,602	
	G14	1900,222	1902,884 \pm 0,326	1937,117 \pm 67,618	0,14%	2,660	1,94%	36,864	
Pendiente 15,4°	G18	1893,152	1895,521 \pm 0,287	1929,197 \pm 67,149	0,13%	2,461	1,90%	35,970	
	G19	1889,623	1891,975 \pm 0,428	1924,466 \pm 66,547	0,12%	2,268	1,84%	34,769	
	G20	1886,767	1889,376 \pm 0,214	1921,562 \pm 67,221	0,14%	2,641	1,84%	34,717	
	G21	1884,271	1886,928 \pm 0,470	1918,679 \pm 66,619	0,14%	2,638	1,83%	34,482	
	G22	1881,150	1883,600 \pm 0,527	1914,545 \pm 67,175	0,13%	2,445	1,78%	33,484	
	G23	1878,365	1880,742 \pm 0,838	1911,709 \pm 66,608	0,13%	2,442	1,78%	33,435	
	G24	1875,453	1877,849 \pm 0,626	1908,209 \pm 66,385	0,13%	2,438	1,75%	32,820	
	G25	1872,863	1875,308 \pm 0,647	1907,299 \pm 66,584	0,13%	2,435	1,84%	34,461	

Desnivel (m)		<i>dGNSS high-end</i>	<i>GNSS low-end</i>	Barómetro	Diferencia Relativa dGNSS high-end GNSS low-end		Diferencia Relativa dGNSS high-end Barómetro	
			Promedio IMUs \pm SD	Promedio IMUs \pm SD	(%)	(m)	(%)	(m)
Pendiente 20,5°	VD1	3,933	3,771 \pm 0,181	3,504 \pm 0,245	4,13%	0,162	10,90%	0,429
	VD2	3,350	3,121 \pm 0,091	4,711 \pm 0,566	6,84%	0,229	40,64%	1,361
	VD3	4,088	4,370 \pm 0,049	3,031 \pm 1,197	6,89%	0,282	25,85%	1,057
	VD4	3,706	3,670 \pm 0,095	5,895 \pm 0,355	0,96%	0,036	59,06%	2,189
	VD5	4,600	4,842 \pm 0,028	4,200 \pm 0,052	5,27%	0,242	8,70%	0,400
	VD6	3,431	3,215 \pm 0,015	4,107 \pm 0,311	6,29%	0,216	19,71%	0,676
	VD7	3,646	3,790 \pm 0,251	2,410 \pm 0,069	3,96%	0,144	33,91%	1,236
Pendiente 15,4°	VD8	3,529	3,546 \pm 0,141	4,731 \pm 0,602	0,48%	0,017	34,06%	1,202
	VD9	2,856	2,599 \pm 0,214	2,904 \pm 0,674	8,99%	0,257	1,69%	0,048
	VD10	2,496	2,447 \pm 0,256	2,883 \pm 0,602	1,95%	0,049	15,51%	0,387
	VD11	3,121	3,328 \pm 0,057	4,134 \pm 0,556	6,64%	0,207	32,45%	1,013
	VD12	2,785	2,858 \pm 0,310	2,836 \pm 0,566	2,62%	0,073	1,84%	0,051
	VD13	2,912	2,893 \pm 0,211	3,500 \pm 0,223	0,65%	0,019	20,20%	0,588
	VD14	2,590	2,541 \pm 0,020	0,910 \pm 0,199	1,89%	0,049	64,86%	1,680

G, puerta; VD, desnivel.

En el caso del desnivel, la magnitud del error en tanto por ciento aumenta debido a que disminuyen los metros analizados. Tal y como se puede observar, los desniveles medidos son de entre 2,5 y 4 m. Para la pendiente de 20,5°, las diferencias relativas entre el dGNSS *high-end* y el GNSS *low-end* oscilan entre el 0,48 y el 9 %, lo que representa unos errores inferiores a 0,28 m. Las diferencias relativas entre el dGNSS *high-end* y el barómetro oscilan entre el 1,7 y el 64,9 %, lo que hace oscilar mucho el error, que puede fluctuar de 0,048 a 1,7 m, respectivamente.

Discusión y conclusiones

Para tomar valores de altitud con el dispositivo IMU, es preferible utilizar el GNSS *low-end* que el barómetro, ya que no se han encontrado diferencias *inter* dispositivo: se pueden utilizar diferentes IMU sin que haya diferencias entre sus medidas, lo que no sucede con el barómetro. Además, se ha demostrado que no hay diferencias entre las medidas de altitud proporcionadas por el dGNSS *high-end* y las medidas proporcionadas por el GNSS *low-end* en ninguna de las pendientes. Contrariamente, las altitudes medidas por el barómetro sí difieren de las altitudes medidas por el dGNSS *high-end* en ambas pendientes. Para altitudes de más de 1800 m, las diferencias del GNSS *low-end* con respecto al dGNSS *high-end* no superan el 0,16 %, lo que representa unos errores inferiores a 3,1 m. En cambio, las diferencias del barómetro con respecto al dGNSS *high-end* son del orden del 2 %, lo que representa unos errores superiores a 30 m.

Para tomar valores de desnivel entre puertas (entre 2,5 y 4 m), tanto el GNSS *low-end* como el barómetro del IMU han demostrado no ofrecer diferencias *inter* dispositivo. Además, ninguno de los instrumentos ha presentado diferencias significativas con el dGNSS *high-end*. Sin embargo,

cuando se observa la magnitud de las diferencias relativas con respecto al dGNSS *high-end*, se evidencia que las diferencias del GNSS *low-end* son muy inferiores a las diferencias que presenta el barómetro. El GNSS *low-end* ofrece unas diferencias que oscilan entre el 0,48 y el 9 %, lo que representa errores inferiores a 0,28 m. En cambio, las diferencias relativas que presenta el barómetro oscilan entre el 1,7 y el 64,9 %, un abanico muy amplio de error que puede llegar a los 2,1 m, un error totalmente inasumible para medir los desniveles entre puertas de un SL. En este sentido, también se recomendaría tomar la medida de desnivel entre puertas con el GNSS *low-end* antes que con el barómetro.

En resumen, para el estudio 2 de esta tesis se descartó la utilización del barómetro para caracterizar el desnivel entre puertas de un trazado de SL. En cambio, los resultados del GNSS *low-end* demostraron que el error de este instrumento sí que podía ser asumible para medir los desniveles entre puertas en un SL en situación dinámica. Sin embargo, en el momento de la realización del estudio 2, el INEFC nos ofreció una ayuda económica que nos permitió alquilar un instrumento de referencia dGNSS *high-end*. Además, también pudimos contar con el soporte técnico de un geólogo, y se optó por combinar el dGNSS *high-end* con la utilización de un dron a fin de crear un MDE del terreno y hacer la caracterización de los diferentes trazados del estudio 2 (véase capítulo 11).

4.2.2. Publicación

Esta publicación es una versión original de: Pérez-Chirinos Buxadé C, Padullés Riu JM, Gavaldà Castet D, Trabucchi M, Fernández-Valdés B, Tuyà Viñas S, Moras Feliu G. Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings. *Sensors*. 2022;22(902):1–14. Published 2022 Jan 25. doi:10.3390/s22030902



Article

Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings

Carla Pérez-Chirinos Buxadé ¹, Josep Maria Padullés Riu ¹ , Dani Gavalda Castet ^{1,2}, Michela Trabucchi ³, Bruno Fernández-Valdés ^{1,4}, Sílvia Tuyà Viñas ¹  and Gerard Moras Feliu ^{1,*}

¹ National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), University of Barcelona (UB), 08038 Barcelona, Spain; cperezchirinos@gencat.cat (C.P.-C.B.); jmpadu@gmail.com (J.M.P.R.); dgavalda@maladetastudio.com (D.G.C.); bfernandez-valdes@tecnocampus.cat (B.F.-V.); stuya@gencat.cat (S.T.V.)

² Val d'Aran School of Sports Technicians (ETEVA), 25598 Lleida, Spain

³ Department of Condensed Matter Physics, University of Barcelona (UB), 08028 Barcelona, Spain; michela.trabucchi@ub.edu

⁴ School of Health Sciences, TecnoCampus, Pompeu Fabra University, 08302 Barcelona, Spain

* Correspondence: gmoras@gencat.cat

Abstract: Small differences in turn cycle structure, invisible to the naked eye, could be decisive in improving descent performance. The aim of this study was to assess the influence of turn cycle structure on the performance of elite alpine skiers using an inertial measurement unit (IMU) in different slalom (SL) course settings. Four SL courses were set: a flat-turned (FT), a steep-turned (ST), a flat-straighter (FS) and a steep-straighter (SS). Five elite alpine skiers (21.2 ± 3.3 years, 180.2 ± 5.6 cm, 72.8 ± 6.6 kg) completed several runs at maximum speed for each SL course. A total of 77 runs were obtained. Fast total times correlate with a longer initiation (INI) time in FT, a shorter steering time out of the turn (STE_{OUT}) in the FT and FS and a shorter total steering time (STE_{IN+OUT}) in the FT and SS courses. The linear mixed model used for the analysis revealed that in the FT-course for each second increase in the INI time, the total time is reduced by 0.45 s, and for every one-second increase in the STE_{OUT} and STE_{IN+OUT} times, the total time increases by 0.48 s and 0.31 s, respectively. Thus, to enhance descent performance, the skier should lengthen the INI time and shorten the STE_{OUT} and STE_{IN+OUT} time. Future studies could use an IMU to detect turn phases and analyze them using the other built-in sensors.

Keywords: inertial measurement unit; wearable sensor; sports biomechanics; kinematics; skiing; turn phases; accelerometer; magnetometer



Citation: Pérez-Chirinos Buxadé, C.; Padullés Riu, J.M.; Gavalda Castet, D.; Trabucchi, M.; Fernández-Valdés, B.; Tuyà Viñas, S.; Moras Feliu, G. Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings. *Sensors* **2022**, *22*, 902. <https://doi.org/10.3390/s22030902>

Academic Editors: Christian Clermont and Darren Stefanyshyn

Received: 30 December 2021

Accepted: 24 January 2022

Published: 25 January 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In alpine skiing competitions, the skier must go through a course that forces the skier to make turns [1]. The ski turn is a fundamental technical element for speed regulation. In competition, the aim is to make turns while losing as little speed as possible, which makes it a subject of interest to both coaches and researchers.

It has been observed that differences in performance are more evident when analyzing the different phases of the turn, as these are more diffuse over the entire turn cycle. [2]. Thus, the division of the turn into its individual phases is essential to obtain a more detailed analysis of the performance of the turn. In the literature, the division of the turn cycle into its different phases is known as the turn cycle structure [3]. There is no consensus on the number of phases into which a turn should be divided. There are authors who have divided the turn into two [4–7], three [2,3,8–10] or four phases [11,12]. However, most studies agree on a fundamental division on two phases within the turn: the initiation (INI) phase, described as the motion between turns where lateral forces are non-existent, and

the steering (STE) phase, characterized as the skier–ski system moving along a curvilinear trajectory with a centrifugal force acting on the system [13].

To determine the phases of a ski-turn on the basis of objective and comparable data, kinetic [4,5,7,8,14] and kinematic [2,6,9,11,15] criteria have been used.

Referring to kinetic criteria, the most widely used systems are pressure insoles, placed in the ski boot [7,8,16], and portable force plates, generally located between the bindings and the skis [5,14]. Both systems measure the interaction between the skier and the skis and use the measurement of the reaction forces against the ground to determine turn phases. Although force platforms have been considered as the reference system for kinetic measurements [17,18], they can affect the skier's technique and comfort due to the added weight in the ski binding complex [18,19]. In contrast, pressure insoles are less invasive in this respect [16,17]. However, their positioning can be a handicap for those skiers that use boots with a thermo-molded liner, which adapts precisely to the foot for the best control of the ski, since placing these insoles could detract from this effect [16]. An additional limitation is that due to their placement, they can only measure the pressure between the plantar surface of the foot and the boot, rather than the actual force transmitted from the skier to the skis [18,20] and not always indicate the magnitude of ground reaction force accurately [18,19].

To determine turn phases using kinematic criteria, two of the most relevant systems according to the literature are video recording systems [2,11,15,21–23] and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) [24–27]. These systems contributed significantly to the precise delimitation of the turn phases based on kinematic analysis of selected body segment positions. Video recording systems have been the reference system for kinematic measurements due to their accuracy [21]. In 2003, Supej and colleagues [28] delimited a ski turn by the turn switch point (TS point), defined as the point of intersection between the skier's center of mass (CoM) line projected onto the snow surface and the average ski line. The TS point has been the reference in the literature to delimit consecutive turns and has helped later studies to define turn phases [2,3,11]. However, the complication of measuring with video recording systems in a natural environment, as well as the small number of turns that can be analyzed and the extensive time for post-processing the data, makes it difficult to collect data on a regular basis. Subsequent studies with wearable systems, such as GNSS receivers, have also proven to be valid for detecting the TS point [24–26] and turn phases [26]. Despite its validity, this system involves the skier wearing a small backpack with a receiver and an antenna placed on the helmet to allow better satellite visibility [27] on what could influence the skier's technique [29]. In addition, the number of satellites and environmental obstructions can affect the quality of the recording data [27].

In recent years, IMUs have been revolutionizing training monitoring in alpine skiing [16,30–32]. They offer a number of advantages that go beyond the limitations of traditional or laboratory methods [30]: (a) work wirelessly; (b) small and lightweight; (c) easy to carry; (d) easy to place; (e) with the capacity to record a large number of data; (f) instantaneous data acquisition. In addition, the fact that all the built-in sensors (accelerometer, gyroscope, GNSS receiver, barometer, magnetometer, etc.) are synchronized optimizes data collection. In the field of alpine skiing, it has been demonstrated that the TS point can be detected with the use of a single IMU through the inclination of the pelvis [16], or data based on the lateral acceleration of the trunk [33] or the angular velocity of the boot [34]. The latter two have been two of the most accurate and precise methodologies [35].

Several studies have highlighted that in the turn cycle structure, the longer INI phase translates into better performance on the turn [2,36]. However, the influence on performance along a ski run (linked curves) has not been investigated yet. Furthermore, in such a changing environment as skiing, it is interesting to assess whether different course settings and steepness of the slope could influence the turn cycle structure or if contrary similar characteristics are observable regardless of the context. To our knowledge, no study has explored turn phases with an IMU or studied whether the turn phases can influence the performance of a whole run in different course settings. Therefore, the aim of this study

was to assess the influence of turn cycle structure on total descent time of elite alpine skiers using an IMU in different slalom course settings.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

Five elite alpine skiers (21.2 ± 3.3 years, 180.2 ± 5.6 cm, 72.8 ± 6.6 kg, 39.6 ± 7.6 slalom International Ski Federation (FIS) Points) participated in the study. Written informed consent was obtained from all participants. All the procedures were approved by the Ethics Committee for Clinical Sport Research of Catalonia (Study Number: 27/CEICGC/2020) and were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki.

2.2. Procedures

2.2.1. IMU Device and Location

An IMU device (WIMU, Realtrack Systems, Almeria, Spain; weight: 70 g; size: $81 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$) was used in this study. Signals from the 3-axial accelerometer (range: $\pm 400 \text{ G}$; sampling frequency: 1000 Hz) and the 3-axial magnetometer (range: ± 8 gauss; sampling frequency: 100 Hz) were used. The IMU was also composed of a gyroscope, a barometer and a GNSS receiver, which were not used in this study. The IMU was attached to the lower back of skiers, at the L4–L5 level, using an adjustable sports lycra belt. This location close to the CoM has been shown to be the best place to assess whole body movement and to detect ski turns [16,37]. In addition, it is a comfortable place to wear for skiers, as they reported not noticing to wear it. The axes of the IMU device were defined as shown in Figure 1. Prior to the measurements, the calibration of IMUs was performed on a flat and even surface with the Z-axis perpendicular to the surface, according to the manufacturer's specifications.

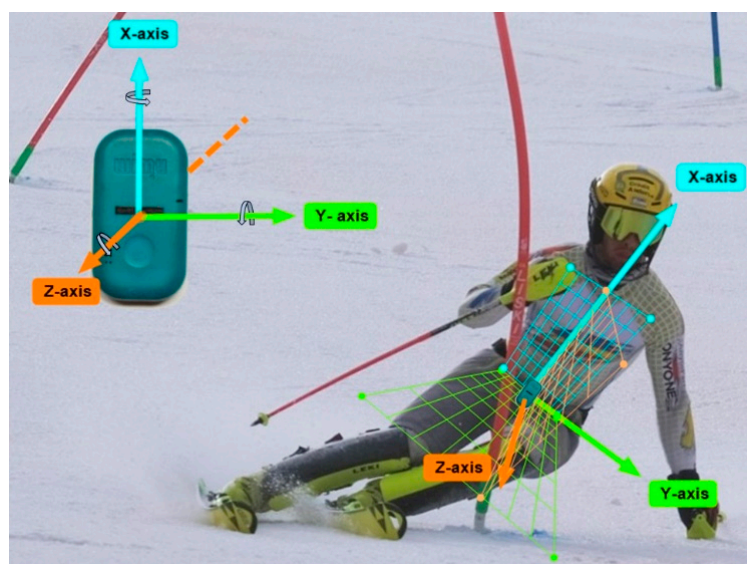


Figure 1. Measurement system and axis orientation. The X-axis (blue) is the vertical one, the Y-axis (green) is the lateral one, and the Z-axis (orange) is the antero-posterior one. Photo reproduced with permission from *Diana Martín i Gamisans/Crèdit Andorrà Supporting* and edited by the author.

2.2.2. Course Setting

Four different SL courses (Figure 2) were set according to the FIS rules [38]. The SL courses were chosen to cover 4 different scenarios in terms of slope (flatter: 12° and steeper: 21°) and type of trajectory (turned: 10.7/4 m course and straighter: 10.7/3.25 m course for vertical gate distance (VGD) and gate offset (GO), respectively) that can be experienced in certain sections during a slalom competition. For simplicity, a code has been given to each of the four SL courses according to their slope and trajectory: the turned course on

the flatter slope (FT), the turned course on the steeper slope (ST), the straighter course on the flatter slope (FS) and the straighter course on the steeper slope (SS). The first letter of the code corresponds to the slope and the second letter to the trajectory. Ten consecutive gates were analyzed for each SL course. Tape measures were used to ensure that gates were placed equidistant from each other in each course. The courses located on the flatter slope (FT, FS) consisted of sixteen gates of which were analyzed from gates six (G6) to fifteen (G15), leaving gate sixteen (G16) at the end. The courses located on the steeper slope (ST, SS) consisted of thirteen gates of which were analyzed from gates nineteen (G19) to twenty-eight (G28), leaving gate twenty-nine (G29) at the end. Bar magnets (D33 mm × 267 mm, ND35, A.C. magnets 98, Barcelona, Spain) were placed on ten consecutive gates for each SL course, following the indications of Pérez-Chirinos Buxadé, et al. [39]. The first gate always turned to the right (left outer leg).

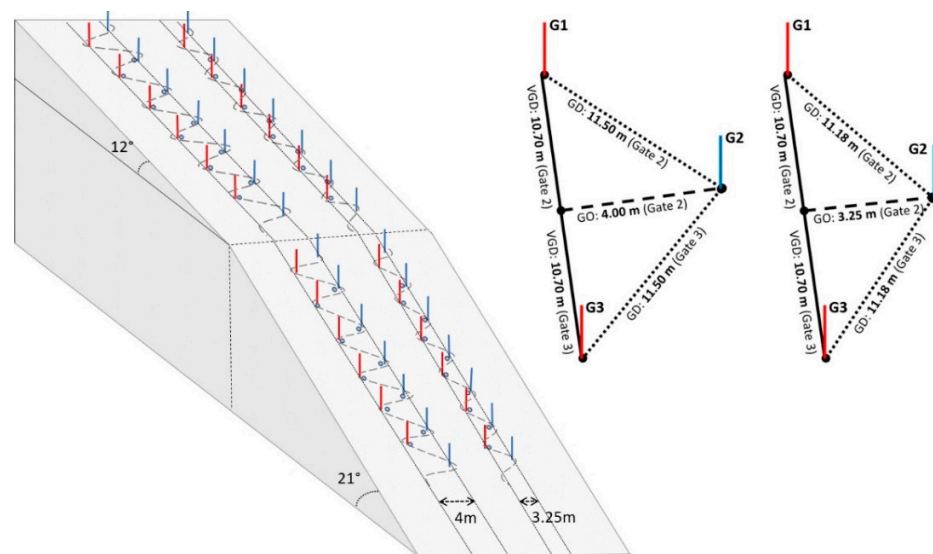


Figure 2. On-hill measurement setup. **Left:** schematic illustration of the four 10-gate SL courses. **Right top:** illustration of the course setting characteristics, characterized by gate distance (GD), gate offset (GO) and vertical gate distance (VGD).

Before starting, the skiers made a reconnaissance run down the courses. Skiers were then asked to complete three to five runs at maximum speed for each of the SL courses. A total of 77 runs were obtained: FT (n = 22), ST (n = 24), FS (n = 16) and SS (n = 15) from Skier 1 (n = 4 FT, 4 ST, 0 FS, 0 SS), Skier 2 (n = 4, 5, 4, 4), Skier 3 (n = 5, 5, 4, 4), Skier 4 (n = 4, 5, 4, 4) and Skier 5 (n = 5, 5, 4, 3). Skier 1 could not perform any descent of the FS and SS courses due to low back pain. A portable Full HD camera (Panasonic HC-V700) recording at 30 Hz was used to synchronize the accelerometry signal of the IMU to the videos of each run for a further visual checking. During data collection, the snow was hard-packed and groomed, and the coaches and experimental team smoothed the course prior to each and every run in an attempt to standardize conditions for side-skiing. Air temperatures progressively increased from 1.1 to 1.9 °C. Relative humidity decreased slightly from 71 to 61%. The maximum wind speed recorded was 6.3 km/h in a south-westerly direction, thus perpendicular to the direction of the ski runs.

2.2.3. Drone Mission and Surveyed Reference Points

In order to generate a Digital Elevation Model (DEM) of the training area, a photogrammetric flight mission was planned using a drone (DJI Mavic Air, SZ DJI Technology Co., Hong Kong, China) equipped with the serial camera DJI, based on a 1.2/3" complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) sensor. After data collection with skiers, the flight mission was created with Drone Harmony Software (Drone Harmony AG, Zürich, Switzerland) that allowed for the creation of missions using an existing reference terrain

model. The mission consisted of flying in grid format to complete 4 passes over the target area of 0.032 km² and was planned with the following parameters: (a) flight speed 5 m/s (stopping and stabilizing before the shot); (b) ground sample distance 2.05 cm; (c) overlap and sidelap 70%; (d) camera angle 80°; (e) ground level of 55 m during the whole flight. The mission included two flights of 13 min 54 s and 8 min 06 s, respectively. A total of 76 high-resolution images were obtained. To provide reference points for the photogrammetry software, multiple precise (sub-centimeter accuracy) GNSS coordinates of all the gates in the four courses were surveyed using a Leica GS18 T RTK GNSS rover (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland). Additionally, the positions of 11 Ground Control Points were also surveyed (Supplementary Materials).

2.3. Data Analysis

2.3.1. Total Time

The skiers' performance was evaluated with the total time of each run. The total time was defined as the time elapsed between the first and tenth gates and was calculated through a validated Magnet-Based Timing System (M-BTS) [39]. Magnets were placed on ten consecutive gates for each SL course, as explained above. The magnetometer built into the IMU detected the peak-shaped magnetic field when passing near the magnets at a certain speed. SPRO software (Realtrack Systems, Almeria, Spain) automatically calculated the time between the first and tenth peaks.

2.3.2. Criterion for Dividing Turns into Phases

For each run, the acceleration signal on the Y-axis coming from the SPRO software was filtered with a zero-lag, 4th order, low-pass Butterworth filter with a cutoff frequency of 6 Hz. This filter cutoff was chosen in order to maintain 95% of the signal power [40]. It was then exported to Microsoft Excel. A routine was programmed in MatLab[®] (The MathWorks, Natick, MA, USA) to separate INI and STE phases. The routine was programmed to detect the maximum acceleration peaks and the zero points of the acceleration signal closest to each side of the peak, which corresponded to the STE phase. The INI phase was then delimited between the STE phases of two consecutive turns.

By plotting the Y-axis of the accelerometer values to the vertical axis of a graph, as shown in Figure 3, right and left turns could be identified. Positive peaks corresponded to right turns (left outer leg) and negative peaks to left turns (right outer leg). If the acceleration approaches the horizontal axis of the origin, as the horizontal axis represents $a = 0$ G, it means that acceleration on the lateral axis is decreasing. On the other hand, if it moves away from the horizontal axis, the acceleration is increasing. Unlike a previous study [33], we identified two main phases within the ski turn using an IMU device. INI phase was limited to the zone in which the acceleration on the Y-axis fluctuated around the zero-value corresponding to the motion between turns and all movements leading to the turn initiation. In this phase, the skier is practically with the CoM projected on the skis; therefore, there is no inclination of the skier's trunk that produces an increase in the acceleration picked up by the Y-axis due to gravity. In contrast, the STE phase was limited to the zones where the acceleration on the Y-axis was moving away from zero, reaching a maximum peak and approaching zero again. This phase corresponded to the skier-ski system moving along a curvilinear trajectory with a centrifugal force acting on it and thus where lateral acceleration is present.

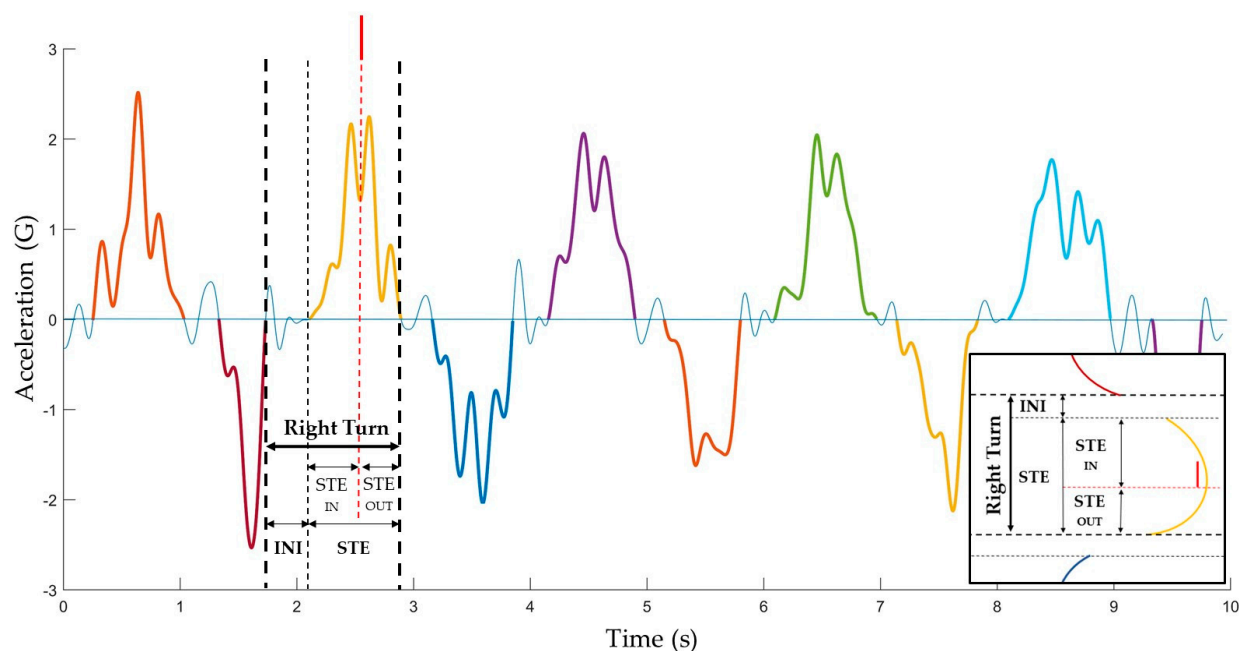


Figure 3. Graphical depiction of Y-axis acceleration and definition of turn phases: INI, initiation phase; STE, steering phase; STE_{IN}, steering phase into the turn; STE_{OUT}, steering phase out of the turn.

By fusing the accelerometer information with an M-BTS that provides the position of the gate on the magnetometer signal [39], it was possible to divide the STE phase by the turn's gate position [11] leading to the steering phases into the turn (STE_{IN}) and out of the turn (STE_{OUT}), where the acceleration on the Y-axis was moving away from zero or approaching zero, respectively (Figure 3).

Finally, for each run, the times corresponding to the same phase were added together, so the total time was decomposed into three partial times: INI time, time of STE_{IN} and time of STE_{OUT}. The two steering times were added together to obtain STE time, hereinafter referred to as STE_{IN+OUT} time. For each run, each of these partial times was expressed as a percentage of the total time.

2.3.3. Digital Elevation Model (DEM)

In order to characterize the terrain and the different course settings, a DEM was created. A photogrammetry software (Agisoft Metashape Professional[®] 1.5.2 version, Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) was used to convert footage from the drone to 3D virtual models. Initially, the program performs a photogrammetric triangulation from the images to identify common points between them and generate a dense cloud of points (46,283,238). This product was used to reconstruct the terrain and generate the initial DEM at a resolution of 4.06 cm/px, and an orthophoto map of 2.03 cm/px. These products were exported to ArcGIS free software (version 10.3, Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA, USA), where a contour map (with 1 m equidistance) was generated from the initial DEM with a resolution of 4.06 cm/px. Afterwards, a slope map and an aspect map were also created at a resolution of 50 cm/px. All data can be accessed in the Supplementary Data file.

2.3.4. Statistical Analyses

A total of 77 runs were analyzed. Despite having numerous runs from each skier for all courses, these are only repetitions from a sample of five. In this sense, the unit of analysis was the skier and the runs were repeated measures. Statistical analyses were performed to assess the influence of turn cycle structure (partial times) on the total descent time. To calculate the correlation, a Pearson's linear correlation coefficient was used, and a scatter

plot was made for each SL course. Each point represented the average of each skier's runs. A Linear Mixed Model (LMM) was implemented for each partial time, where the skier corresponded to the random factor, the total time variable was the response variable and the partial time variable was the explanatory variable. The results reported correspond to the Analysis of Deviance Table (Type III Wald F tests with Kenward–Roger degrees of freedom [41]).

In addition, to explain the time differences more visually, the fastest and slowest runs for each skier on each SL course were selected. A bar graph was used to compare the mean of the fastest runs with the mean of the slowest runs for each SL run.

All database management tasks and statistical analyses were performed using R v4.0.4 software [42]. The significance level for all statistical tests was set at 5% ($p < 0.05$) or 10% ($p < 0.1$), indicated with an asterisk or with a dot, respectively.

3. Results

Figure 4 shows the results of the correlations between the total descent time and the partial times (INI time, time of STE_{IN} , time of STE_{OUT} and STE_{IN+OUT} time). Each point represents the average of each skier's runs.

By comparing INI time with total time, it was observed that as INI time increased, the total time decreased in all courses. The FT course had the highest and most significant correlation ($r = -0.951$, p -value = 0.013). In the FS and SS courses, the correlations between INI time and total time were high but not statistically significant ($r = -0.669$, p -value = 0.331 and $r = -0.774$, p -value = 0.226, respectively). Regarding the ST course, the correlation was weak and not significant ($r = -0.467$, p -value = 0.428).

The correlations between time of STE_{IN} and total time ranged from $r = 0.702$ (FT course) to $r = 0.022$ (SS course) and were not significant in any of the courses.

When comparing STE_{OUT} with total time, the longer the time of STE_{OUT} , the longer the total time. The correlations between both times in the FT, FS and SS courses were 0.909, 0.937 and 0.815, respectively, with significance at 5% in the FT course and at 10% in the FS course. The weakest correlation was in the ST course ($r = 0.688$, p -value = 0.199).

Similarly, when comparing STE_{IN+OUT} time with total time, it was observed that by increasing STE_{IN+OUT} time, so did the total time in all courses. The correlations between both times in the FT, FS and SS courses were 0.98, 0.846 and 0.892, respectively, with significance at 5% in the FT course and at 10% in the SS course. The correlation in the ST course was moderate without statistical significance ($r = 0.629$, p -value = 0.255).

The linear mixed model used for the analysis revealed that INI time, time of STE_{OUT} and STE_{IN+OUT} time were good predictors of the total time in the FT course. Specifically, for every one-second increase in INI time, total time decreased by 0.45 s (LMM, $F(1,3.40) = 6.61$, p -value = 0.073), and for every one-second increase in STE_{OUT} and STE_{IN+OUT} times, the total time increased by 0.48 s (LMM, $F(1,3.52) = 4.13$, p -value = 0.025) and 0.31 s (LMM, $F(1,3.34) = 11.76$, p -value = 0.035), respectively.

To visually highlight the differences between the fastest and slowest descents of each course, a bar graph was used (Figure 5). Although the results were purely descriptive, they complement the correlation analysis and the linear mixed model developed. The mean of the fastest and the slowest runs differed 2.5% on the FT course (8.43 ± 0.26 s vs. 8.64 ± 0.34 s), 3.3% on the ST course (8.56 ± 0.10 s vs. 8.84 ± 0.17 s), 2.4% on the FS course (7.68 ± 0.21 s vs. 7.86 ± 0.30 s) and 2% on the SS course (8.09 ± 0.17 s vs. 8.26 ± 0.19 s). Fast runs tended to have a longer INI time (FT: 1.95%, ST: 1.83%, FS: 1.90%, SS: 2.98%), a shorter time of STE_{OUT} (FT: -2.58%, ST: -1.93%, FS: -1.59% and SS: -2.49%) and a shorter STE_{IN+OUT} time (FT: -1.95%, ST: -1.83%, FS: -1.90% and SS: -2.98%), regardless of the course setting and steepness of the slope. In reference to the time of STE_{IN} , similar results were observed between fast and slow descents. Another observation was that turned courses had a longer STE_{IN+OUT} time than straighter courses—concretely—time of STE_{OUT} predominated in the FT course and time of STE_{IN} predominated in the ST course.

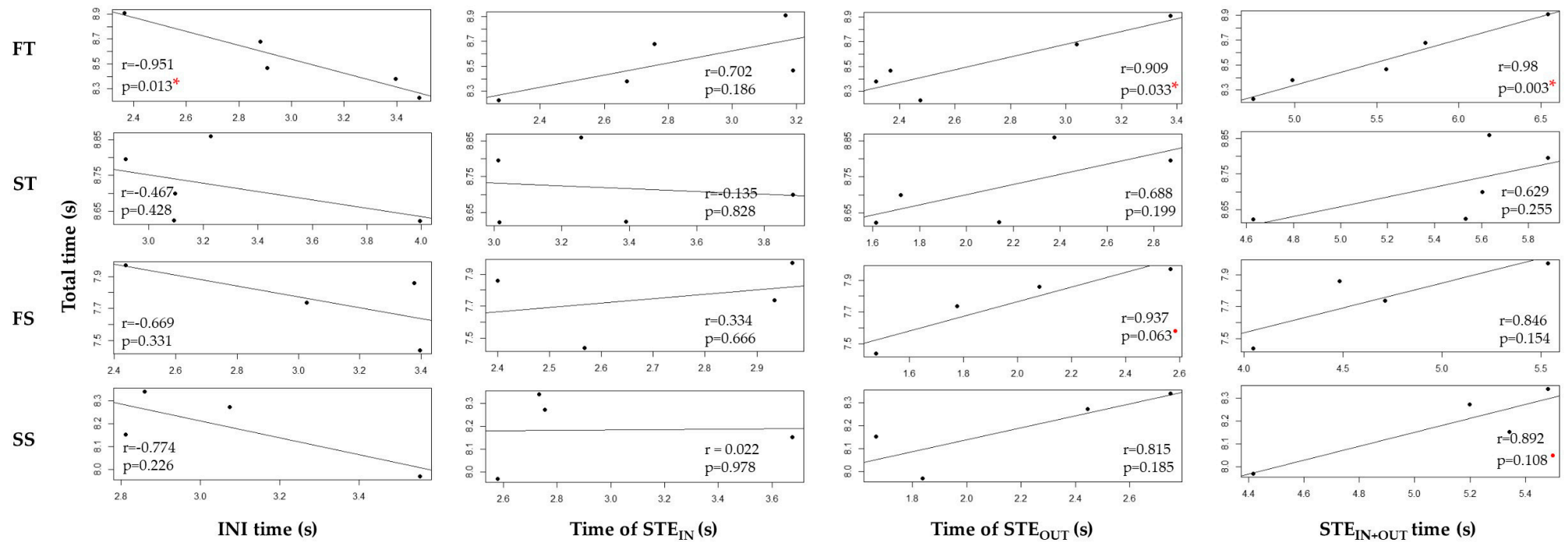


Figure 4. Correlations between the total descent time and the partial times (INI time, initiation time; time of STE_{IN}, time of steering into the turn; time of STE_{OUT}, time of steering out of the turn; STE_{IN+OUT} time, steering time) for four SL-courses (FT, flat turned course; ST, steep turned course; FS, flat straighter course; SS, steep straighter course). r , coefficient of correlation; p , level of significance at 5% or 10%, indicated with a red asterisk or a dot, respectively.

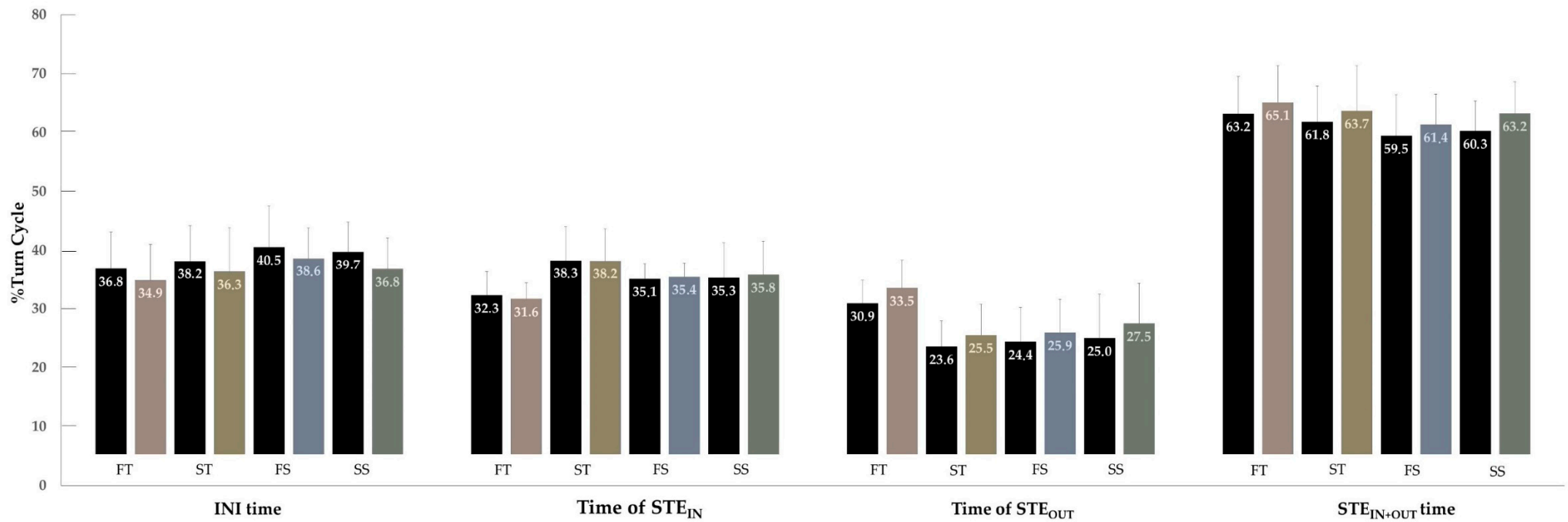


Figure 5. Comparison of turn cycle structure between Fast (black) vs. Slow (colored) runs for four SL courses: FT, flat turned course; ST, steep turned course; FS, flat straighter course; SS, steep straighter course. INI time, initiation time; Time of STE_{IN}, time of steering into the turn; Time of STE_{OUT}, time of steering out of the turn; STE_{IN+OUT} time, steering time. Values are means \pm SD.

4. Discussion and Conclusions

The purpose of this study was to assess the influence of turn cycle structure on the total descent time of elite alpine skiers using an IMU in different slalom course settings.

To our knowledge, this is the first study to date to determine turn phases by means of an IMU using kinematic criteria. A previous study already used lateral acceleration of the trunk to delimit linked turns in alpine skiing [33]. In this study, we wanted to follow this idea because of its high accuracy and precision [35]. However, for the present study, an accelerometer with a five times higher sampling frequency was used to clearly differentiate turn phases into the INI and STE_{IN+OUT} phases. Moreover, with the use of an IMU device, it is possible to detect the skier passing through the gates while performing a course [39]. This allowed for the incorporation of the position of the gate, with respect to the turn cycle structure, and to divide the STE_{IN+OUT} phase into STE_{IN} and STE_{OUT} phases.

The main finding was that regardless of course settings and steepness of the slope, lengthening the INI time and shortening the time of STE_{OUT} had an influence on improving descent performance. Time of STE_{IN} did not have any influence on total time.

With regard to INI time, the results obtained are in line with other findings. Spörri et al. [2] analyzed biomechanical aspects of giant slalom turns through a video-based system and observed that when comparing the fastest with the slowest turns in a 26/12 m course, the fastest had a 2.5% longer initiation in the turn cycle structure. In a similar way, Vaverka et al. [36], who analyzed left and right turns using a dynamometric system in a 14/4 m SL course, found that shorter duration turns had a 1.9% longer initiation. Unlike those mentioned above, the present study evaluated the influence of the turn cycle structure on the total descent time rather than on an isolated turn and was carried out in four different SL course settings. Fast runs tended to have a 1.95% longer INI time in the FT course, a 1.83% longer INI time in the ST course, a 1.90% longer INI time in the FS course and a 2.98% longer INI time in the SS course. The correlation between INI time and total time was high in the FT, FS and SS courses, with significance in the FT course (Figure 4). In addition, the predictive model was significant in the FT course, which indicated that for each second increase in the INI time, the total time is reduced by 0.45 s. This reduction of the total time by increasing the duration of the INI time is due to the fact that the lengthening of this phase optimizes the performance of the other phases by shortening them. Through the INI phase, the CoM increases speed until reaching maximal speeds close to the start of the STE_{IN} phase [3]. If we were to make the analogy with the motor world, the turn's INI phase would be like stepping on the accelerator. For this reason, it may be of interest to lengthen this phase as much as possible but without negatively affecting the following turn phases.

Concerning the time of STE_{IN}, it did not influence the total time. This fact could be explained because although the STE_{IN} phase is mostly towards the direction of the fall line [9], it is very likely that also includes a steering part out of the fall line since the STE phase was divided by the gate position and not by the fall line [11]. In the case of the FT course, there was a higher correlation than the other courses. A possible explanation could be that, in this case, most of the turn occurred before reaching the gate and that, therefore, the moment of the lowest skis' turns radii and the highest energy dissipation occurred in the STE_{IN} phase [11,43], which was a flat terrain; this phase tended to decrease the total time. No article has been found that has discussed this phase and analyzed it from the point of view of the turn cycle structure. However, Spörri et al. [2] described a CoM direction change phase that would include the STE_{IN} phase and a part of the STE_{OUT} phase. They conclude that in a 26/10 m course, the CoM direction change phase was 2.7% shorter in fast turns and that there were no clear differences between fast and slow turns for the 26/12 m course.

Regarding the time of STE_{OUT}, the results indicated that this was a decisive phase of the turns that influenced descent performance, especially in the flatter courses (FT and FS), where there was a very high significant correlation (Figure 4). In the FT course, the time of STE_{OUT} is a good predictor of total time; for every one second increase in STE_{OUT}, total time increases by 0.48 s. As other authors have previously reported, this phase directs

the skier–ski system away from the fall line [9] and, therefore, would be the equivalent of stepping on the brake. With the introduction of the carving technique, the time of STE_{OUT} was reduced compared to traditional parallel turns [8]. The STE_{OUT} phase defined in this study resembles the completion phase defined by Spörri et al. [2], where the fastest turn on a 26/12 m course had a 3.7% shorter completion. Similar results were reported in this study, where the fastest runs had a 2.58% shorter STE_{OUT} time in the FT course, a 1.93% shorter STE_{OUT} time in the ST course, a 1.59% shorter STE_{OUT} time in the FS course and a 2.49% shorter STE_{OUT} time in the SS course.

As for the STE_{IN+OUT} time, the results found were in accordance with those of Vaverka and colleagues, where the shortest duration turns had a shorter STE_{IN+OUT} phase [36]. Although they analyzed it for a turn, the same behavior was observed for a whole run. Fastest descents had a shorter STE_{IN+OUT} time in all of the courses (Figure 5). The highest and most significant correlations between total time and STE_{IN+OUT} time were observed in the FT and SS courses (Figure 4). In addition, in the FT course, STE_{IN+OUT} time was found to be a good predictor of total time. Specifically, a one-second increase in STE_{IN+OUT} time implies a 0.31 s increase in total time. The STE_{IN+OUT} phase defined in this study resembles the combination of the CoM direction change and completion phases defined by Spörri et al. [2]; however, a comparison with STE_{IN+OUT} is not feasible since Spörri analyzed both phases separately.

One of the features of the present study is the fact that it compares four different SL courses. Since the context of skiing is so changeable, it has been of interest to study how different slopes [22] and trajectories [2,3] have affected technical aspects. However, to the authors' knowledge, this is the first study to consider steepness of the slope and trajectory together. In this study, in each SL course, the slope and trajectory were kept homogeneous in order to compare the four different scenarios. Terrain characterization is very important since, with it not being in a laboratory, it is necessary to control the external factors that can influence the results. For this reason, a DEM was generated to collect the variables of both the terrain and the configuration of the SL courses. It should be noted that capturing topographic data using drone photography to produce 3D models and DEMs has become more accessible and is an easier and more economical method for obtaining topographic data than traditional methods, such as real-time kinetic Global Positioning System mapping [44,45].

The conclusion of this study is that, regardless of the context, similar characteristics were observed in turn cycle structure for the fastest runs. In order to enhance descent performance, the skier should lengthen the INI time and shorten the STE_{OUT} time of the runs, thus reducing the STE_{IN+OUT} time. In general, straighter courses (FS and SS) had longer INI times and shorter STE_{IN+OUT} times than turned courses (FT, ST) and vice versa. It should be noted that for turned courses, the steepness of the slope had been the cause of the STE_{IN} time predominating, as in the case of the ST course, or the STE_{OUT} time predominating, as in the case of the FT course.

Small differences in turn cycle structure cannot be detected with the naked eye when a skier is descending at more than 40 km/h. This unnoticed aspect has proven to be decisive for performance when the differences between the best skiers are hundredths of a second. Therefore, the use of an IMU device will amplify the coach's eye, allowing for the detection of small, but highly significant weaknesses.

5. Summary and Future Work

With the use of a single IMU device placed in the lower back of the skiers, it is possible to analyze the turn cycle structure that can help improve descent performance. Future applications could focus on the effect of other kinematic aspects coming from other sensors integrated in the IMU, including angular velocities, accelerations and even asymmetry detection that may have an influence on performance. It would also be interesting to analyze whether similar results in terms of turn cycle structure would also be found for other modalities, such as giant-slalom, super-G and downhill.

A limitation of the present study is that only five skiers were analyzed. This limits the generalizability of the study findings. However, in most of the literature that have used elite athletes in alpine skiing, studies with a single subject design are common, and very few exceed the sample size of this study. Therefore, the authors would like to emphasize the importance of having been able to obtain a sample of five elite alpine skiers to conduct the present study.

Our knowledge of the factors that determine performance in alpine skiing is currently relatively limited. The use of IMU devices, either individually or in combination with other systems, can help improve our understanding of this sport. Its user-friendly interaction is making it widely used not only in research settings, but also in the field to complement the analysis and feedback from coaches.

Supplementary Materials: The following are available online at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/s22030902/s1>, Document S1: Characteristics of terrain and course settings.

Author Contributions: Conceptualization, C.P.-C.B., J.M.P.R. and G.M.F.; data curation, C.P.-C.B., J.M.P.R., D.G.C., M.T. and G.M.F.; formal analysis, C.P.-C.B., J.M.P.R., B.F.-V., S.T.V. and G.M.F.; funding acquisition, C.P.-C.B.; investigation, C.P.-C.B., J.M.P.R., D.G.C., B.F.-V., S.T.V. and G.M.F.; methodology, C.P.-C.B., J.M.P.R. and G.M.F.; project administration, C.P.-C.B. and G.M.F.; resources, C.P.-C.B., J.M.P.R., D.G.C., M.T. and G.M.F.; software, C.P.-C.B., J.M.P.R., D.G.C., M.T., B.F.-V. and G.M.F.; supervision, J.M.P.R. and G.M.F.; visualization, C.P.-C.B., J.M.P.R., D.G.C., M.T., B.F.-V., S.T.V. and G.M.F.; writing—original draft, C.P.-C.B.; writing—review & editing, J.M.P.R., D.G.C., M.T., B.F.-V., S.T.V. and G.M.F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by The Ministry of Education, Culture and Sport; the first author (C.P.-C.B.) is the recipient of a predoctoral fellowship (FPU18/04647). This paper also received the support of the National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), University of Barcelona (UB), and the Research Group in Physical Activity and Health (GRAFIS, Generalitat de Catalunya 2017SGR/741).

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and approved by Ethics Committee for Clinical Sport Research of Catalonia (Study Number: 27/CEICGC/2020).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: Characteristics of terrain and course settings can be downloaded from Supplementary Materials.

Acknowledgments: The authors would like to thank the participating skiers as well as the Andorran ski federation (FAE) for the technical support, the Chronojump-Boscosystem Association for the valuable contributions and, lastly, to the Servei d'Estadística Aplicada of the Autonomous University of Barcelona (UAB), especially to Anabel Blasco-Moreno.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. International Ski Federation (FIS). FIS International Ski Competition Rules ICR. 2020. Available online: <https://www.fis-ski.com/en/inside-fis/document-library/alpine-documents#9a7d11be565ad65858070c99> (accessed on 13 April 2021).
2. Spörri, J.; Kröll, J.; Schwameder, H.; Müller, E. Turn characteristics of a top world class athlete in giant slalom: A case study assessing current performance prediction concepts. *Int. J. Sports Sci. Coach.* **2012**, *7*, 647–659. [[CrossRef](#)]
3. Reid, R.C. *A Kinematic and Kinetic Study of Alpine Skiing Technique in Slalom*; Norwegian School of Sport Sciences in Oslo: Oslo, Norway, 2010.
4. Nachbauer, W. Fahrlinie in Torlauf und Riesentorlauf. *Leistungssport* **1987**, *6*, 17–21.
5. Müller, E. Analysis of the biomechanical characteristics of different swinging techniques in alpine skiing. *J. Sports Sci.* **1994**, *12*, 261–278. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Raschner, C. *Kinematische und Dynamische Technikanalyse im Slalom als Grundlage für die Entwicklung Skispezifischer Krafttrainingsgeräte und Krafttrainingsmethoden*; University of Salzburg: Salzburg, Austria, 1997.
7. Vaverka, F.; Vodickova, S.; Elfmark, M. Kinetic analysis of ski turns based on measured ground reaction forces. *J. Appl. Biomech.* **2012**, *28*, 41–47. [[CrossRef](#)]

8. Müller, E.; Schwameder, H. Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *J. Sports Sci.* **2003**, *21*, 679–692. [[CrossRef](#)]
9. Müller, E.; Bartlett, R.; Raschner, C.; Schwameder, H.; Benko-Bernwick, U.; Lindinger, S. Comparisons of the ski turn techniques of experienced and intermediate skiers. *J. Sports Sci.* **1998**, *16*, 545–559. [[CrossRef](#)]
10. Ogrin, J.; Šarabon, N.; Madsen, M.K.; Kersting, U.; Holmberg, H.-C.; Supej, M. Asymmetries in Ground Reaction Forces During Turns by Elite Slalom Alpine Skiers Are Not Related to Asymmetries in Muscular Strength. *Front. Physiol.* **2021**, *12*, 431. [[CrossRef](#)]
11. Supej, M.; Holmberg, H.-C. How gate setup and turn radii influence energy dissipation in slalom ski racing. *J. Appl. Biomech.* **2010**, *26*, 454–464. [[CrossRef](#)]
12. Falda-Buscaiot, T.; Hintzy, F.; Rougier, P.; Lacouture, P.; Coulmy, N. Influence of slope steepness, foot position and turn phase on plantar pressure distribution during giant slalom alpine ski racing. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0176975. [[CrossRef](#)]
13. Howe, J. *Skiing Mechanics*; Poudre Press: Laporte, CO, USA, 1983; 160p.
14. Schwameder, H.; Nigg, B.M.; Tscharnner, V.; Stefanyshyn, D. The effect of binding position on kinetic variables in alpine skiing. In Proceedings of the 2nd International Congress on Skiing and Science, St. Christoph am Arlberg, Austria, 9–15 January 2000; Müller, E., Ed.; Kovacs: Hamburg, Germany, 2001; pp. 43–54.
15. Reid, R.C.; Haugen, P.; Gilgien, M.; Kipp, R.W.; Smith, G.A. Alpine Ski Motion Characteristics in Slalom. *Front. Sports Act. Living* **2020**, *2*, 25. [[CrossRef](#)]
16. Yu, G.; Jae Jang, Y.; Kim, J.; Kim, J.H.; Kim, H.Y.; Kim, K.; Panday, S.B. Potential of IMU Sensors in Performance Analysis of Professional Alpine Skiers. *Sensors* **2016**, *16*, 463. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Nakazato, K.; Scheiber, P.; Müller, E. A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *J. Sports Sci. Med.* **2011**, *10*, 754–762. [[PubMed](#)]
18. Martínez, A.; Nakazato, K.; Scheiber, P.; Snyder, C.; Stöggl, T. Comparison of the Turn Switch Time Points Measured by Portable Force Platforms and Pressure Insoles. *Front. Sports Act. Living* **2020**, *2*, 1–7. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Stricker, G.; Scheiber, P.; Lindenhofer, E.; Müller, E. Determination of forces in alpine skiing and snowboarding: Validation of a mobile data acquisition system. *Eur. J. Sport Sci.* **2010**, *10*, 31–41. [[CrossRef](#)]
20. Nakazato, K.; Scheiber, P.; Müller, E. Comparison between the force application point determined by portable force plate system and the center of pressure determined by pressure insole system during alpine skiing. *Sports Eng.* **2013**, *16*, 297–307. [[CrossRef](#)]
21. Klous, M.; Müller, E.; Schwameder, H. Collecting kinematic data on a ski/snowboard track with panning, tilting, and zooming cameras: Is there sufficient accuracy for a biomechanical analysis? *J. Sports Sci.* **2010**, *28*, 1345–1353. [[CrossRef](#)]
22. Supej, M.; Hébert-losier, K.; Holmberg, H. Impact of the Steepness of the Slope on the Biomechanics of World Cup Slalom Skiers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2015**, *10*, 361–368. [[CrossRef](#)]
23. Spörri, J.; Kröll, J.; Schwameder, H.; Müller, E. The role of path length- and speed-related factors for the enhancement of section performance in alpine giant slalom. *Eur. J. Sports Sci.* **2018**, *18*, 911–919. [[CrossRef](#)]
24. Fasel, B.; Spörri, J.; Gilgien, M.; Boffi, G.; Chardonnes, J.; Müller, E.; Aminian, K. Three-Dimensional Body and Centre of Mass Kinematics in Alpine Ski Racing Using Differential GNSS and Inertial Sensors. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 671. [[CrossRef](#)]
25. Fasel, B.; Spörri, J.; Gilgien, M.; Gerber, N.; Falbriard, M.; Müller, E.; Aminian, K. IMU and GNSS-based Turn Switch Detection in Alpine Ski Racing. In *Science and Skiing VII, Proceedings of the 7th International Congress on Science and Skiing, St. Christoph/Arlberg, Austria, 10–15 December 2016*; Meyer & Meyer Sport: Aachen, Germany, 2018; pp. 86–92.
26. Gilgien, M.; Kröll, J.; Spörri, J.; Crivelli, P.; Müller, E. Application of dGNSS in Alpine Ski Racing: Basis for Evaluating Physical Demands and Safety. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 145. [[CrossRef](#)]
27. Supej, M.; Spörri, J.; Holmberg, H.-C. Methodological and Practical Considerations Associated With Assessment of Alpine Skiing Performance Using Global Navigation Satellite Systems. *Front. Sports Act. Living* **2020**, *1*, 74. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Supej, M.; Nemec, B. Kinematic determination of the beginning of a ski turn. *Kinesiol. Slov.* **2003**, *9*, 11–17.
29. Krüger, A.; Edelmann-Nusser, J. Application of a Full Body Inertial Measurement System in Alpine Skiing: A Comparison With an Optical Video Based System. *J. Appl. Biomech.* **2010**, *26*, 516–521. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Supej, M.; Holmberg, H.-C. Monitoring the Performance of Alpine Skiers with Inertial Motion Units: Practical and Methodological Considerations. *J. Sci. Sport Exerc.* **2021**, *3*, 249–256. [[CrossRef](#)]
31. Snyder, C.; Martínez, A.; Jahnel, R.; Roe, J.; Stöggl, T. Connected skiing: Motion quality quantification in alpine skiing. *Sensors* **2021**, *21*, 3779. [[CrossRef](#)]
32. Fasel, B.; Gilgien, M.; Spörri, J.; Aminian, K. A New Training Assessment Method for Alpine Ski Racing: Estimating Center of Mass Trajectory by Fusing Inertial Sensors With Periodically Available Position Anchor Points. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 1203. [[CrossRef](#)]
33. Yamagiwa, S.; Ohshima, H.; Shirakawa, K. Skill scoring system for ski's parallel turns. In Proceedings of the 2nd International Congress on Sports Sciences Research and Technology Support—icSPORTS 2014, Rome, Italy, 16–18 October 2014; pp. 121–128.
34. Martínez, A.; Jahnel, R.; Buchecker, M.; Snyder, C.; Brunauer, R.; Stöggl, T. Development of an Automatic Alpine Skiing Turn Detection Algorithm Based on a Simple Sensor Setup. *Sensors* **2019**, *19*, 902. [[CrossRef](#)]
35. Martínez, A.; Snyder, C.; Moore, S.R.; Stöggl, T. A comprehensive comparison and validation of published methods to detect turn switch during alpine skiing. *Sensors* **2021**, *21*, 2573. [[CrossRef](#)]
36. Vaverka, F.; Vodickova, S. Laterality of the lower limbs and carving turns. *Biol. Sport* **2010**, *27*, 129–134. [[CrossRef](#)]

37. Montgomery, P.G.; Pyne, D.B.; Minahan, C.L. The physical and physiological demands of basketball training and competition. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2010**, *5*, 75–86. [[CrossRef](#)]
38. International Ski Federation. *The International Ski Competition Rules (ICR) Book IV Joint Regulations for Alpine Skiing*; International Ski Federation FIS: Oberhofen, Switzerland, 2019; 128p.
39. Pérez-Chirinos Buxadé, C.; Fernández-Valdés, B.; Morral-Yepes, M.; Tuyà Viñas, S.; Padullés Riu, J.M.; Moras Feliu, G. Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU. *Sensors* **2021**, *21*, 5773. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Neuwirth, C.; Snyder, C.; Kremser, W.; Brunauer, R.; Holzer, H.; Stöggl, T. Classification of alpine skiing styles using GNSS and inertial measurement units. *Sensors* **2020**, *20*, 4232. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
41. Kenward, M.G.; Roger, J.H. Small Sample Inference for Fixed Effects from Restricted Maximum Likelihood. *Biometrics* **1997**, *53*, 983–997. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. 2021. Available online: <https://www.r-project.org/> (accessed on 23 October 2021).
43. Reid, R.C.; Gilgien, M.; Morger, T.; Tjørhom, H.; Haugen, P.; Kipp, R.; Smith, G. Turn characteristics and energy dissipation in slalom. In *Science and Skiing IV*; Müller, E., Lindinger, S., Stöggl, T., Eds.; Meyer & Meyer Sport: Maidenhead, UK, 2009; pp. 419–429.
44. Morton, R.A.; Leach, M.P.; Paine, J.G.; Cardoza, M.A. Monitoring Beach Changes Using GPS Surveying Techniques. *J. Coast. Res.* **1999**, *9*, 702–720. Available online: <http://www.jstor.org/stable/4298124> (accessed on 10 December 2021).
45. Erdmann, W.S.; Giovanis, V.; Aschenbrenner, P.; Kiriakis, V.; Suchanowski, A. Methods for acquiring data on terrain geomorphology, course geometry and kinematics of competitors' runs in alpine skiing: A historical review. *Acta Bioeng. Biomech.* **2017**, *19*, 69–79.

5. Resultados principales

En este capítulo se realiza un resumen de los resultados principales obtenidos en los diferentes estudios de la tesis (tabla 7).

Tabla 7. Resultados principales de los estudios de la tesis

	Test	Variable analizada	Principales resultados
Estudio 1	60-m lineales de carrera	- Tiempo secciones (s) (M-BTS vs. fotocélulas) - Tiempo total de la carrera (s) (M-BTS vs. fotocélulas)	- Rango de error del 95%: tiempo de secciones (-0,024 s; 0,068 s); tiempo total (0,011 s; 0,087 s). - Bland–Altman: tiempo de secciones (sesgo de $0,011 \pm 0,021$ s y límite de acuerdo de -0,030–0,052 s); tiempo total (sesgo de $0,054 \pm 0,023$ s y límite de acuerdo de 0,008–0,099 s). - Análisis de regresión lineal: tiempo de secciones ($R^2 = 0,999$; $p < 0,0001$); tiempo total ($R^2 = 0,999$; $p < 0,0001$).
	Trazado de SL de cuatro puertas	- Tiempo secciones (s) (M-BTS vs. fotocélulas) - Tiempo total de la bajada (s) (M-BTS vs. fotocélulas)	- Rango de error del 95%: tiempo de secciones (-0,079 s; 0,061 s); tiempo total (-0,035 s; 0,015 s). - Bland–Altman: tiempo secciones (sesgo de $-0,004 \pm 0,043$ s y límite de acuerdo de -0,089–0,080 s); tiempo total (sesgo de $-0,013 \pm 0,020$ s y límite de acuerdo de -0,052–0,026 s). - Análisis de regresión lineal: tiempo de secciones ($R^2 = 0,814$; $p < 0,0001$); tiempo total ($R^2 = 0,987$; $p < 0,0001$).

5. Resultados principales

	Test	Variable analizada	Principales resultados
Estudio 2	4 trazados de SL de esquí de diez puertas cada uno: FT, ST, FS y SS	- Tiempos parciales de cada fase de la curva de esquí (s): tiempo INI, tiempo STE _{IN} , tiempo STE _{OUT} y tiempo STE _{IN+OUT} - Tiempo total de la bajada (s)	- Las bajadas con los tiempos totales menores se correlacionan con un mayor tiempo INI en el trazado FT ($r = -0,951$; $p < 0,05$), un menor tiempo STE _{OUT} en FT ($r = 0,909$; $p < 0,05$) y FS ($r = 0,937$; $p < 0,1$) y un menor tiempo STE _{IN+OUT} en FT ($r = 0,980$; $p < 0,05$) y SS ($r = 0,892$; $p < 0,1$). - El modelo lineal mixto utilizado para el análisis reveló que en el trazado FT por cada segundo de aumento en el tiempo INI, el tiempo total se reduce en 0,45 s, y por cada aumento de un segundo en los tiempos STE _{OUT} y STE _{IN+OUT} , el tiempo total aumenta en 0,48 s y 0,31 s, respectivamente.

R^2 , coeficiente de determinación; r , coeficiente de correlación lineal de Pearson; p , nivel de significación. FT, el trazado girado en la pendiente suave; ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada; FS, el trazado más recto en la pendiente suave, y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada.

6. Discusión común

En esta tesis se ha comprobado la viabilidad de la utilización de un sistema de análisis compuesto por un dispositivo IMU y unos imanes colocados a lo largo del trazado. Con este sistema se pretende evaluar la curva de esquí y sus fases, lo que en la literatura se conoce como la «estructura de la curva de esquí» (6).

El hallazgo principal de esta tesis ha sido demostrar que pequeñas diferencias en la estructura de la curva de esquí, como la duración de las diferentes fases de la curva, tienen una gran influencia en el tiempo total de la bajada y, por tanto, en el rendimiento de los esquiadores alpinos de élite.

En un deporte donde la diferencia en el *ranking* depende de centésimas de segundo (13,53), los pequeños detalles pueden cambiar la clasificación. En 2020, por ejemplo, en la Copa del Mundo de Eslalon de Esquí Alpino, celebrada en Madonna di Campiglio (Italia), la diferencia entre el primer y el cuarto puesto en la general fue de menos de medio segundo. Además, entre los diez primeros esquiadores hubo diferencias de menos de 1 s (144). Sin embargo, cuando un esquiador desciende a más de 40 km/h (6–9), las pequeñas diferencias en la estructura de la curva de esquí son imperceptibles a simple vista. Por ello, es necesario utilizar sistemas de análisis del movimiento que se adapten a las singularidades del esquí alpino y permitan mantener la máxima exactitud y precisión.

Mientras que el análisis de vídeo en 3D requiere un montaje experimental muy complejo en un entorno natural (6) y conlleva varias horas de postprocesamiento para analizar una sola curva de un esquiador (3,24,39,77,80), el sistema utilizado en esta tesis es fácil de usar de manera regular en los entrenamientos y permite medir a varios esquiadores y bajadas completas en cuestión de minutos sin influir en la técnica de los

deportistas. Además, se optó por la simplicidad: un único dispositivo IMU fijado a la zona baja de la espalda (L4-L5) de los esquiadores y unos imanes enterrados en la nieve al lado de cada puerta del trazado.

La presente tesis se ha estructurado en dos estudios interrelacionados. El primer estudio desarrolló y evaluó la validez del M-BTS, un sistema de cronometraje basado en imanes y el magnetómetro del dispositivo IMU. El segundo estudio evaluó la influencia de la estructura de la curva de esquí en el rendimiento de los esquiadores alpinos al bajar por diferentes trazados de SL a través del acelerómetro de un dispositivo IMU y del M-BTS. En el segundo estudio, la validación del M-BTS sirvió para detectar el momento en que el esquiador pasaba por las diferentes puertas del trazado y para determinar el tiempo total de las bajadas.

El sistema M-BTS consiste en enterrar un imán al lado de cada una de las puertas del trazado. El magnetómetro integrado en el IMU detecta el campo magnético en forma de pico al pasar cerca de los imanes a una velocidad determinada. El momento en que se produce el pico en la escala temporal del magnetómetro se corresponde con el momento en que el esquiador está más cerca de la puerta. De esta manera, el sistema M-BTS permite incorporar el momento de paso por la puerta con respecto a la estructura de la curva, dividiendo la fase STE en las fases STE_{IN} y STE_{OUT}.

Fasel *et al.* (126) fueron los pioneros en validar un M-BTS en el contexto del esquí alpino. No obstante, el magnetómetro que utilizaron tenía una mayor frecuencia de muestreo (166,7 Hz) comparado con el magnetómetro del IMU utilizado en la presente tesis (100 Hz). Esta baja frecuencia de muestreo limita la resolución temporal de nuestro sistema a 0,01s (lo que corresponde a una distancia recorrida de entre 0,097 y 0,139 m al esquiar a velocidades de SL de entre 9,7 y 14 m/s, respectivamente). Aun así, la resolución del magnetómetro utilizado es adecuada para detectar el

momento en que el esquiador pasa por las puertas del trazado (6). En caso de que fuera necesario aumentar el grado de resolución, una posible vía sería aumentar la frecuencia de muestreo mediante interpolación lineal (126). En esta línea, el sistema de cronometraje GNSS desarrollado por Supej *et al.* ya utilizaba la interpolación para obtener una medida de la posición del esquiador cada 0,001 m y detectar el paso por la puerta con gran exactitud y precisión (62,145).

Además, calculando el intervalo de tiempo entre el primer y el último pico (primera y última puerta del trazado) obtenemos el tiempo total de la bajada. En el primer estudio, el M-BTS demostró medir el tiempo total de una sección de un trazado de SL de cuatro puertas con una exactitud de $-0,013 \pm 0,020$ s y con un rango de error del 95 % de 0,050 s comparado con el sistema de cronometraje de referencia basado en fotocélulas de haz simple. Dado que el tiempo obtenido a través del M-BTS propuesto mostró diferencias relativamente pequeñas y una dispersión estrecha en comparación con las mediciones de las fotocélulas, este fue el sistema utilizado para calcular el tiempo total de las bajadas por los trazados FT, ST, FS y SS que se realizaron en el segundo estudio.

Cabe destacar que, aunque el sistema propuesto sea un poco menos preciso que las fotocélulas, presenta una serie de ventajas prácticas para un contexto como el del esquí: **(a)** Requiere un tiempo de preparación menor respecto a las fotocélulas, ya que no se pierde tiempo en la alineación correcta del transmisor/receptor con el reflector. Esta alineación es imprescindible, pues debe ser perpendicular a la dirección del movimiento para minimizar los errores (62). En movimientos lineales, como un *sprint*, esta alineación es más fácil. Sin embargo, en los movimientos curvilíneos, como las curvas de esquí, es más complejo determinar la orientación perpendicular del movimiento, puesto que para cada carrera y esquiador será diferente. **(b)** Se

6. Discusión común

fija en un lugar del cuerpo, el mismo para todos los deportistas, asegurando así que la detección del pico se produzca siempre en la misma situación: cuando el IMU pasa más cerca del imán (126,127). De esta manera se elimina el problema de que los deportistas corten aleatoriamente los haces de luz de las fotocélulas con diferentes partes del cuerpo (146). **(c)** Elimina el riesgo de accidente por colisión que sí tienen las fotocélulas. En el esquí, por ejemplo, existe una normativa oficial sobre cómo construir y colocar los postes de madera que soportan las fotocélulas para minimizar los daños en caso de colisión (138). **(d)** Es ajeno a las condiciones meteorológicas adversas y puede utilizarse en cualquier lugar, tanto en interiores como en exteriores. **(e)** Permite obtener más tiempos intermedios, como los tiempos entre puertas, que darán información detallada sobre el rendimiento (62,126,145). **(f)** Permite utilizar los picos obtenidos de la señal del magnetómetro como marcadores para seleccionar y cortar las señales pertenecientes a los demás sensores integrados en el IMU que están sincronizados en la misma escala temporal.

No obstante, el M-BTS también presenta algunas limitaciones: **(a)** Los resultados del test de *sprint* lineal de 60 m obtenidos en el primer estudio mostraron la influencia que tenía la velocidad en la exactitud y precisión de la medida. Se observó una tendencia a que la dispersión de las diferencias de tiempo disminuyera al aumentar la velocidad de manera progresiva en cada una de las secciones (0-5 m, 5-10 m, 10-20 m, 20-40 m y 40-60 m). Una posible explicación de esto es que los picos registrados a mayor velocidad reducen su anchura, lo que permite una mayor exactitud en su localización (126). En este sentido, en contextos competitivos, se recomienda el uso de fotocélulas, ya que la exactitud y precisión del resultado no dependen de la velocidad. En la presente tesis se ha comprobado la validez del sistema M-BTS con velocidades por encima de los 20 km/h (que son altamente superadas en el esquí). A velocidades

inferiores sería necesario considerar otro tipo de sistema de medida. **(b)** Otra limitación es la distancia entre el magnetómetro y el imán. Esta no puede ser superior a 1 m para garantizar la detección del campo magnético. En la disciplina de SL, esta distancia está garantizada cuando el nivel técnico del esquiador es elevado. En estudios recientes, el M-BTS también se ha utilizado con atletas de élite en GS (70). Sin embargo, con esquiadores de menor nivel, y especialmente en disciplinas de velocidad (SG y DH), la distancia a la que el esquiador pasa con respecto a la puerta puede ser mayor a 1 m y el magnetómetro puede no detectar adecuadamente el campo magnético de los imanes. Esto podría contrarrestarse aumentando la profundidad del campo magnético de los imanes o colocando varios imanes a lo largo de una línea perpendicular a las trayectorias de esquí previstas (70,126). **(c)** El tiempo total no se reporta instantáneamente, como en el caso de las fotocélulas, sino que es necesario el uso de un *software* para tratar la señal del magnetómetro del IMU. No obstante, con la ayuda del monitor de detección de picos del *software* SPRO es posible obtener el tiempo entre picos de forma automática. Existe la opción de tener los datos en tiempo real con la ayuda de una antena que conecte el dispositivo IMU con el ordenador vía Bluetooth (147). Sin embargo, el ordenador y el dispositivo IMU no pueden estar excesivamente alejados, lo que en el contexto del esquí no es viable.

En el segundo estudio de esta tesis se evaluó la influencia de la estructura de la curva de esquí en el rendimiento de los esquiadores alpinos al bajar por diferentes trazados de SL mediante el acelerómetro de un dispositivo IMU y el M-BTS. El esquí alpino de competición requiere que los esquiadores bajen por multitud de trazados: es posible encontrar secciones donde la distancia horizontal entre puertas sea muy reducida y, por lo tanto, el esquiador pueda seguir una trayectoria más recta, y otras donde una mayor distancia horizontal obligue a seguir una trayectoria más girada. A

6. Discusión común

su vez, los trazados estarán sujetos a la geomorfología que presente el terreno, como las diferentes pendientes.

En dicho estudio, además de identificar cuál es la estructura de la curva de esquí vinculada con los mejores tiempos de la bajada, se analizó la forma en la que esta estructura se ve afectada por la variabilidad del terreno y el trazado.

Para ello, se realizó el marcaje de cuatro trazados de SL de diez puertas de acuerdo con las normas de la FIS (10). Los trazados fueron elegidos para cubrir cuatro escenarios diferentes en cuanto a pendiente (12° —suave— vs. 21° —pronunciada—) y trayectoria (10,70/4,00 m —más girada— vs. 10,70/3,25 m —más recta—). La trayectoria se modificó aumentando la distancia horizontal entre las puertas del trazado (4,00 m vs. 3,25 m). La distancia vertical se mantuvo siempre igual (10,70 m). Las diez puertas de cada trazado fueron equidistantes verticalmente y horizontalmente. Los cuatro trazados fueron los siguientes: el trazado girado en la pendiente suave (FT: 12° ;10,70/4,00 m), el trazado girado en la pendiente pronunciada (ST: 21° ;10,70/4,00 m), el trazado más recto en la pendiente suave (FS: 12° ;10,70/3,25 m) y el trazado más recto en la pendiente pronunciada (SS: 21° ;10,70/3,25 m).

Se propuso una división de la curva de esquí en dos fases principales: fase INI y fase STE. La fase INI se describe como el movimiento entre curvas en el que no existen fuerzas laterales. La fase STE se caracteriza por el desplazamiento del sistema esquiador-esquí a lo largo de una trayectoria curvilínea con una fuerza centrífuga que actúa sobre el sistema (59). A su vez, la fase STE se divide en las fases STE_{IN} y STE_{OUT} de la curva de esquí en función del momento de paso por la puerta (22). En SL, la duración de las curvas es de aproximadamente 0,8 s (1), y la duración de las fases INI y STE puede oscilar entre el 35 y el 40 % y el 60 y el 65 % del tiempo total

6. Discusión común

de la curva, respectivamente (37), lo que representa movimientos con una duración de décimas de segundo. Para el análisis de acciones de tan corta duración, las frecuencias de muestreo de los sistemas de medida deben ser altas a fin de cumplir con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon.

En la presente tesis, para determinar las fases principales (INI y STE) de la curva de esquí, se utilizó el acelerómetro triaxial incorporado en el dispositivo IMU (frecuencia de muestro: 1000 Hz), que permite una resolución de 0,001 s. Hasta la fecha, por lo que sabemos, este es el primer estudio que determina las fases de la curva de esquí mediante un IMU utilizando criterios cinemáticos. Concretamente, se utilizó el eje lateral del acelerómetro para analizar la aceleración lateral del tronco. El análisis se basó en la modelización tradicional del movimiento del esquiador como un péndulo invertido (53,95,96,139,140), donde la posición neutra del péndulo se produce durante el momento de transición entre curvas consecutivas (fase INI). En consecuencia, se corresponde con el período de cero aceleración lateral. Yamagiwa *et al.* ya utilizaron la aceleración lateral del tronco para determinar los puntos TS de las curvas de esquí (48). En la presente tesis se ha querido seguir esta metodología por su alta exactitud y precisión (26), pero utilizando un acelerómetro con una frecuencia de muestreo cinco veces mayor que permitió diferenciar claramente las fases principales de la curva: INI y STE. La detección del paso del esquiador por las puertas a través del M-BTS facilitó la división de la fase STE en las fases STE_{IN} y STE_{OUT} (127).

Hasta la fecha solo se han encontrado algunos autores que han observado cómo pequeñas diferencias en la estructura de la curva podrían ser decisivas para mejorar el rendimiento en dicha curva (19,35,36). A diferencia de estos estudios, el segundo estudio de esta tesis evaluó la influencia de la estructura de la curva en el tiempo total de descenso y no solamente en una

curva aislada. Para cada bajada se analizaron todas las curvas y sus fases, y se sumaron los tiempos correspondientes a la misma fase, por lo que el tiempo total de la bajada se descompuso en tres tiempos parciales: tiempo INI, tiempo STE_{IN} y tiempo STE_{OUT} . Los tiempos STE_{IN} y STE_{OUT} se sumaron para obtener el tiempo STE, en adelante denominado tiempo STE_{IN+OUT} . Los resultados obtenidos muestran que, independientemente del tipo de trazado, las bajadas más rápidas incrementaron el tiempo INI y redujeron el tiempo STE_{OUT} , reduciendo así el tiempo STE_{IN+OUT} . El tiempo STE_{IN} no tuvo ninguna influencia en el tiempo total.

En cuanto al tiempo INI, varios estudios han destacado que, en la estructura de la curva de esquí, la fase INI más larga se traduce en una reducción del tiempo de la curva, es decir, un mejor rendimiento en la curva (19,35). Spörri *et al.* (19) utilizaron un sistema basado en vídeo y observaron que, al comparar las curvas más rápidas con las más lentas en un trazado de GS, las más rápidas tenían una fase INI un 2,5 % más larga. De forma similar, Vaverka *et al.* (35), quienes utilizaron sensores de fuerza para analizar las curvas de un trazado de SL, encontraron que las curvas de menor duración tenían una fase INI un 1,9 % más larga. Los resultados obtenidos en el segundo estudio de esta tesis van en línea con estos resultados. Concretamente, en las bajadas más rápidas, el tiempo INI incrementó un 1,95 % en el trazado FT, un 1,83 % en el trazado ST, un 1,90 % en el trazado FS y un 2,98 % en el trazado SS. La correlación entre el tiempo INI y el tiempo total fue alta en los trazados FT, FS y SS, siendo significativa en el trazado FT. Además, el modelo lineal mixto utilizado para el análisis estadístico reveló que, en el trazado FT, por cada segundo de aumento en el tiempo INI, el tiempo total se reduce en 0,45 s. Esta reducción del tiempo total al aumentar la duración del tiempo INI se debe a que la prolongación de esta fase en las curvas de esquí optimiza el rendimiento de las demás fases, acortándolas. En cada curva, a través de la fase INI, el CdM aumenta

la velocidad hasta alcanzar la máxima cerca del inicio de la fase STE_{IN} (6). Si hiciéramos la analogía con el mundo del motor, la fase INI de las curvas sería como pisar el acelerador. Si los esquiadores pisaran el acelerador una décima más en cada curva, esto repercutiría positivamente en el tiempo total de la bajada. Por ello, puede ser interesante alargar esta fase al máximo posible, pero sin afectar negativamente a las siguientes fases de la curva, pues, en el esquí, la energía cinética depende directamente de la conversión de la energía potencial, en lugar de depender de la producción de energía que el deportista es capaz de realizar. Esta característica es distintiva respecto a otros deportes y hace que sea posible alcanzar velocidades que superan las capacidades del deportista simplemente reduciendo la disipación de energía (3). Por ello, la estrategia de alargar la fase INI en cada curva puede estar limitada por una especie de «barrera de velocidad» por encima de la cual el atleta necesita controlar la velocidad para evitar errores o lesionarse (30). Cada esquiador tendrá una barrera de velocidad que variará en función de factores externos (pendiente, trazado, calidad de la nieve, etc.) o internos (condición física, técnica, táctica, control perceptivo motor, etc.). Aunque es difícil asumir la contribución de cada uno de estos factores y sus interacciones, conocer la barrera de velocidad de cada esquiador en cada situación podría ser clave para la mejora del rendimiento (148).

En cuanto al tiempo STE_{IN} , este no influyó en el tiempo total de la bajada para ninguno de los cuatro trazados analizados. Aunque, en una curva de esquí, la fase STE_{IN} se produce mayoritariamente hacia la dirección de la línea de máxima pendiente, (21) es muy probable que también incluya una parte de conducción fuera de la línea de máxima pendiente, ya que la fase STE se dividió por el momento de paso por la puerta y no por la línea de máxima pendiente (22). En el caso de los trazados situados en la pendiente suave (FT y FS), sí que se detectó una tendencia de aumento del tiempo

6. Discusión común

total a medida que aumentaba el tiempo STE_{IN} , sobre todo en el caso del trazado FT, aunque esta no fue significativa. Aunque la fase STE_{IN} se produzca mayoritariamente hacia la dirección de la línea de máxima pendiente (21), no deja de ser una fase de conducción de la curva donde se produce rozamiento con la nieve (3,30) y, por tanto, disipación de la energía. Además, varios autores han destacado que en esta fase de la curva es donde se produce el momento de menor radio de curvatura de los esquís, lo que reafirma que haya una mayor disipación de energía (22,149). Un aumento en la disipación de energía tendrá más repercusión en una pendiente suave que en una pendiente pronunciada, ya que la energía potencial disponible por curva es menor (3). Por lo tanto, se tardará más en recuperar la velocidad perdida (30,40), y la afectación al resultado de la carrera será mayor (19,30,32,40), lo cual es coherente con los resultados obtenidos. Cabe destacar que no se ha encontrado ningún artículo que haya discutido esta fase y la haya analizado desde el punto de vista de la estructura de la curva. Sin embargo, Spörri *et al.* (19) describieron una fase de cambio de dirección del CdM que incluía la fase STE_{IN} y una parte de la fase STE_{OUT} . En ese estudio compararon dos trazados de GS, uno con una trayectoria más recta (26/10 m) y otro con una trayectoria más girada (26/12 m). Concluyeron que, en el trazado 26/10 m, la fase de cambio de dirección del CdM era un 2,7 % más corta en las curvas rápidas y que no había diferencias claras entre las curvas rápidas y las lentas para el trazado 26/12 m. En nuestro caso, tal y como se ha comentado anteriormente, el tiempo STE_{IN} no ha influido significativamente en el tiempo total de la bajada para ninguno de los cuatro trazados analizados.

En cuanto al tiempo STE_{OUT} , los resultados indicaron que era una fase decisiva de las curvas de esquí que influía en el rendimiento de las bajadas, especialmente en los trazados con las pendientes más suaves (FT y FS), observándose una correlación significativa muy alta. En el trazado FT, el

tiempo STE_{OUT} es un buen predictor del tiempo total; por cada aumento de un segundo en el tiempo STE_{OUT} , el tiempo total aumenta en 0,48 s. Como otros autores han descrito previamente, esta fase dirige el sistema esquiador-esquí fuera de la línea de máxima pendiente (21) y, por tanto, sería el equivalente a pisar el freno. En un deporte donde el motor principal es la energía potencial gravitacional almacenada (3), pisar el freno en pendientes suaves equivale a una pérdida de velocidad que es muy difícil de recuperar (19,30,32,40). Con la introducción del esquí *carving*, el tiempo STE_{OUT} se redujo en comparación con el esquí tradicional (20). La fase STE_{OUT} definida en este estudio se asemeja a la fase de finalización definida por Spörri *et al.* (19), quienes observaron una disminución de un 3,7 % en la duración de esta fase en la curva más rápida en un trazado de GS de 26/12 m. En el presente estudio se obtuvieron resultados similares, ya que las bajadas más rápidas redujeron el tiempo STE_{OUT} un 2,58 % en el trazado FT, un 1,93 % en el trazado ST, un 1,59 % en el trazado FS y un 2,49 % en el trazado SS.

En cuanto al tiempo STE_{IN+OUT} , las bajadas más rápidas tuvieron un tiempo STE_{IN+OUT} más corto en todos los trazados. Los resultados encontrados coinciden con los de Vaverka *et al.*, quienes señalaron que las curvas de menor duración tienen una fase de conducción más corta (35). Aunque lo analizaron para una curva, se observó el mismo comportamiento para una bajada completa. Las correlaciones más altas y significativas entre el tiempo total y el tiempo STE_{IN+OUT} se observaron en los trazados FT y SS. Además, en el trazado FT, el tiempo STE_{IN+OUT} resultó ser un buen predictor del tiempo total. En concreto, un aumento de un segundo en el tiempo STE_{IN+OUT} implica un aumento de 0,31 s en el tiempo total. La fase STE_{IN+OUT} definida en este estudio se asemeja a la combinación de las fases de cambio de dirección del CdM y de finalización definidas por Spörri *et al.* (19). Sin embargo, no es posible realizar una comparación, ya que Spörri

analizó ambas fases por separado.

Además de identificar cuál es la estructura de la curva de esquí vinculada con los mejores tiempos de la bajada, la forma en la que esta estructura se ve afectada por la variabilidad del terreno y el trazado también se abordó en el segundo estudio de la tesis. Hasta donde sabe la autora, este es el primer estudio que considera conjuntamente diferentes pendientes y diferentes trayectorias para estudiar su influencia en la estructura de la curva de esquí. Solamente se ha encontrado un estudio previo en la literatura que haya examinado la influencia del factor pendiente en la estructura de la curva de esquí en SL (40). En referencia al factor trayectoria, la mayoría de estudios se han realizado en GS, y solamente un estudio fue realizado en SL (6). No obstante, las fases de división de la curva son diferentes a las que se han propuesto en esta tesis.

Los resultados obtenidos han mostrado que tanto el factor trayectoria como el factor pendiente han hecho aumentar el tiempo total de las bajadas. Los trazados girados (FT y ST) han sido los que mayores tiempos totales han obtenido. Para una misma trayectoria, los trazados ubicados en la pendiente pronunciada han aumentado su tiempo total.

A continuación se discutirán los resultados obtenidos en esta tesis sobre la influencia del factor trayectoria y del factor pendiente en la estructura de la curva de esquí.

El factor trayectoria favorece que aumente el tiempo STE_{IN+OUT} . Estos resultados van en línea con los resultados de Spörri *et al.* (65), quienes comprobaron que, al aumentar la distancia horizontal entre las puertas de un trazado de GS, se alargó la fase de conducción de la curva de esquí. En su estudio también observaron que disminuyó la velocidad en la fase de finalización de la curva, la fuerza centrípeta actuó durante más tiempo —y

se duplicó en la fase de finalización—, y predominó la posición retrasada de los esquiadores (peso en las colas de los esquís) y la inclinación lateral (hacia el interior de la curva), llevándolos a adoptar posiciones que desencadenan situaciones de desequilibrio. La relación entre los trazados girados (FT y ST) y el aumento del tiempo total era de esperar y puede explicarse por la energía que se disipa durante la fase STE_{IN+OUT} debido al rozamiento con la nieve (3,30). Varios estudios han demostrado que, en una bajada de SL, la mayor parte de la energía se disipa durante la fase de conducción de las curvas (fase STE_{IN+OUT}), concretamente, en la zona del paso por la puerta, mientras que la menor disipación ocurre durante la transición entre curvas (fase INI) (3,30). Por lo tanto, al aumentar la duración de la fase STE_{IN+OUT} de las curvas, también lo hace el intervalo de tiempo en que el esquiador está disipando energía y, en consecuencia, aumenta el tiempo total de la bajada.

En este contexto, para mejorar el rendimiento de los esquiadores se ha propuesto minimizar la energía de disipación que se produce durante el rozamiento con la nieve (3,30) de manera que se eviten los radios de curvatura más pequeños (30,108,149) y se alarguen un poco más las curvas (19). Además, también se ha demostrado que los esquiadores de élite disipan menor energía cuando la conducción de sus curvas es cortada en vez de derrapada (3,19,30,53). Ahora bien, la disminución de la disipación de energía por sí sola no es un factor que pueda predecir el rendimiento, ya que en una sección del trazado es posible alcanzar un mayor rendimiento a pesar de la misma disipación de energía (19). Una posible razón podría encontrarse en la distribución de la disipación de energía en las diferentes fases de la curva. En este contexto, se ha visto que, para conseguir reducir el tiempo de sección, una menor disipación de energía y una mayor velocidad al principio de la curva puede ser más ventajosa, ya que esta alta velocidad está actuando durante más tiempo a lo largo de la curva (19).

En referencia al factor pendiente, este no ha modificado el tiempo STE_{IN+OUT} , ya que ha mostrado ser prácticamente el mismo entre pendientes. Sin embargo, en la pendiente pronunciada se ha aumentado el tiempo STE_{IN} y disminuido el tiempo STE_{OUT} para los trazados girados. Supej *et al.* (2015) (40), comparando curvas de SL en dos pendientes diferentes ($25,2^\circ$ vs. $19,8^\circ$), vieron que, en la pendiente más pronunciada, las curvas fueron más bruscas —con un radio de giro más corto y con el ápice situado antes de la puerta—, el pico de fuerza de reacción de la nieve se concentró en la mitad de la fase de conducción, las angulaciones laterales de las rodillas y las caderas fueron más pronunciadas al inicio de la fase de conducción, y hubo una mayor disipación de energía antes de la puerta, así como una menor disipación después de la puerta. Estos resultados son compatibles con una prolongación de la fase STE_{IN} de las curvas de esquí —resultados como los que se han observado en el segundo estudio de esta tesis—. Sin embargo, en su estudio no encontraron ningún efecto debido al factor pendiente en cuanto a la estructura de la curva. Una posible explicación podría ser que no hubo suficiente diferencia entre los grados de inclinación de las pendientes que compararon. Por otro lado, contrariamente a lo que se podía pensar, para una misma trayectoria, la pendiente pronunciada ha aumentado el tiempo total de las bajadas. Estos resultados van en línea con los resultados de Supej *et al.* (40), que indicaron que, en la pendiente más pronunciada, la velocidad fue menor en todas las fases de la curva. Este comportamiento podría explicarse por la barrera de la velocidad, comentada anteriormente. Seguramente, la pendiente sea un factor que modifique dicha barrera y obligue al esquiador a controlar más la velocidad para poder realizar el trazado sin errores y sin asumir riesgos innecesarios (30).

Para finalizar se ha querido destacar que, a fin de encontrar respuestas a preguntas relacionadas con el rendimiento, son indispensables los

6. Discusión común

experimentos en condiciones reales (19,28,31,33,38,41,44,61,63). En este sentido, la caracterización del terreno es muy importante, ya que, al no estar en un laboratorio, es necesario controlar los factores externos que pueden influir en los resultados. Un claro ejemplo es la influencia que ha tenido la modificación de la pendiente del terreno y la trayectoria del trazado en la estructura de la curva de esquí. Por este motivo, se generó un MDE para recoger las variables tanto del terreno como de la configuración de los trazados del SL. Cabe destacar que la captura de datos topográficos mediante la fotogrametría a través de drones se ha vuelto más accesible y es un método más fácil y económico que los métodos tradicionales como los teodolitos y los taquímetros (67,150).

7. Conclusiones

En la siguiente sección se discutirán las conclusiones basadas en los dos estudios. Se responderá a cada uno de los objetivos y metas fijados para esta tesis con el fin de determinar el resultado del proyecto.

Objetivo 1:

Desarrollar y evaluar la validez de un sistema de cronometraje basado en imanes (M-BTS) para cronometrar acciones deportivas de corta duración utilizando el magnetómetro de un dispositivo IMU.

Las acciones de corta duración, como realizar un *sprint* lineal de 5, 10, 20, 40 o 60 m o bajar por una sección de dos, tres o cuatro puertas en un trazado de SL, requieren sistemas de medición del tiempo que sean exactos y precisos. Una de las tecnologías de cronometraje más utilizadas en estos contextos deportivos es la fotocélula. Sin embargo, este sistema presenta algunas limitaciones, como la larga preparación y, en el contexto del esquí, el número limitado de secciones que es posible analizar, respecto al total de secciones posibles. En los últimos años, la posibilidad de utilizar un M-BTS para medir acciones deportivas de corta duración se ha convertido en una buena alternativa.

En el primer estudio de la tesis se desarrolla y evalúa la validez de un M-BTS para cronometrar acciones deportivas de corta duración utilizando el magnetómetro de un IMU. El M-BTS ha demostrado ser válido para cronometrar acciones deportivas que van de 0,6 a 7,9 s en una carrera de *sprint* lineal y de 0,9 a 3,2 s en un trazado de SL de esquí alpino. El sistema propuesto podría utilizarse en lugar de las fotocélulas durante los entrenamientos regulares en diferentes contextos deportivos, teniendo en cuenta que no se detectarían los cambios sutiles en el rendimiento por

7. Conclusiones

debajo de los rangos de error del 95 % indicados.

En esta tesis, el M-BTS permitió medir con una exactitud de $-0,013 \pm 0,020$ s y una precisión (rango de error del 95 %) de 0,050 s el tiempo total de las bajadas por un trazado de SL de cuatro puertas. Además, permitió incorporar el momento de paso por la puerta con respecto a la estructura de la curva, con una resolución de centésimas de segundo (0,01 s), dividiendo la fase STE en las fases STE_{IN} y STE_{OUT}.

Las principales ventajas del M-BTS propuesto son que: **(a)** puede aplicarse en diferentes contextos deportivos manteniendo los movimientos técnicos de los deportistas, **(b)** permite el análisis de trazados completos (puerta a puerta), **(c)** elimina el riesgo de accidente por colisión, **(d)** elimina el problema de que los deportistas corten aleatoriamente los haces de luz con diferentes partes del cuerpo, **(e)** es ajeno a las condiciones meteorológicas adversas y, **(f)** puede utilizarse para seccionar las series temporales de los otros sensores integrados en el dispositivo IMU.

Las principales limitaciones del M-BTS propuesto son que: **(a)** la exactitud y precisión del resultado dependen de la velocidad —se recomiendan velocidades por encima de los 20 km/h—, **(b)** la distancia entre el magnetómetro y el imán no puede ser superior a 1 m para garantizar la detección del campo magnético y, **(c)** el tiempo total no se reporta instantáneamente, como en el caso de las fotocélulas, sino que es necesario el uso de un *software* para tratar la señal del magnetómetro del IMU.

Objetivo 2:

Evaluar la influencia de la estructura de la curva de eslalon en el rendimiento de los esquiadores alpinos al bajar por diferentes trazados a través del acelerómetro de un dispositivo IMU y del M-BTS.

7. Conclusiones

El hallazgo principal de esta tesis ha sido demostrar que pequeñas diferencias en la estructura de la curva de esquí, como la duración de las diferentes fases de la curva, tienen una gran influencia sobre el tiempo total de la bajada y, por tanto, en el rendimiento de los esquiadores alpinos de élite.

Las pequeñas diferencias en la estructura de la curva del esquí son imperceptibles a simple vista cuando un esquiador desciende a más de 40 km/h. El uso de un dispositivo IMU (acelerómetro: 1000 Hz; magnetómetro: 100 Hz) y unos cuantos imanes permite la detección de las siguientes fases de la curva: INI, STE_{IN}, STE_{OUT} y STE_{IN+OUT}. A diferencia de estudios previos, en esta tesis se evaluó la influencia de la estructura de la curva en el tiempo total de bajada y no en una curva aislada. Para cada bajada se analizaron todas las curvas y sus fases, y se sumaron los tiempos correspondientes a la misma fase, por lo que el tiempo total de una bajada se descompuso en los siguientes tiempos parciales: tiempo INI, tiempo STE_{IN}, tiempo STE_{OUT} y tiempo STE_{IN+OUT}. Independientemente del tipo de trazado, las bajadas más rápidas incrementaron el tiempo INI y redujeron el tiempo STE_{OUT}, reduciendo así el tiempo STE_{IN+OUT}. El tiempo STE_{IN} no tuvo ninguna influencia en el tiempo total.

Además de identificar cuál es la estructura de la curva de esquí vinculada con los mejores tiempos de la bajada, la forma en la que esta estructura se ve afectada por la variabilidad del entorno y el trazado también se abordó en la presente tesis. Hasta donde saben los autores, este es el primer estudio que considera conjuntamente diferentes pendientes (12° y 21°) y diferentes trayectorias (10,7/4 m y 10,7/3,25 m) para estudiar su influencia en la estructura de la curva de esquí.

Los trazados más rectos (FS y SS) tuvieron tiempos INI más largos y tiempos STE_{IN+OUT} más cortos que los trazados girados (FT, ST), y

7. Conclusiones

viceversa. Tanto el factor trayectoria como el factor pendiente han hecho aumentar el tiempo total de las bajadas. Los trazados girados (FT y ST) han sido los que mayores tiempos totales han obtenido. Para una misma trayectoria, los trazados ubicados en la pendiente pronunciada han aumentado su tiempo total. Hay que señalar que el factor trayectoria favorece que aumente el tiempo STE_{IN+OUT} . En referencia al factor pendiente, el tiempo STE_{IN+OUT} prácticamente es el mismo entre pendientes. No obstante, este ha favorecido que aumente el tiempo STE_{IN} y disminuya el tiempo STE_{OUT} .

Actualmente, el conocimiento de los factores que determinan el rendimiento en el esquí alpino es relativamente limitado. El uso de dispositivos IMU, ya sea individualmente o en combinación con otros sistemas, puede ayudar a mejorar la comprensión de este deporte. La sencilla aplicación de estos sistemas, sobre todo en un contexto tan singular como el del esquí, facilitará que se utilicen ampliamente, no solo en el ámbito de la investigación sino también en los entrenamientos en pista, a fin de complementar el análisis y aportar objetividad al *feedback* de los entrenadores.

8. Aplicaciones prácticas para el análisis del rendimiento

Este capítulo puede ser de especial interés para los entrenadores y entrenadoras de esquí alpino, dado que se explican diferentes parámetros que ayudarán a analizar el rendimiento de los esquiadores en base a criterios objetivos.

A medida que fraccionamos el tiempo total en intervalos de tiempo más pequeños capaces de medir la duración de elementos clave de la técnica —por ejemplo, el tiempo transcurrido entre puertas (62,126) o la duración de las fases de las curvas de esquí de un trazado— podemos obtener muchos más detalles que permiten explicar mejor el rendimiento. En los dos estudios que configuran esta tesis se ha presentado, por un lado, un sistema de cronometraje basado en imanes y el magnetómetro de un dispositivo IMU (M-BTS) y, por otro lado, una metodología para delimitar las diferentes fases de la curva de esquí mediante el M-BTS y el acelerómetro del IMU. En este capítulo se definen cinco parámetros específicos de rendimiento que se pueden obtener con este sistema y metodología (tabla 8). Los parámetros que se han seleccionado han demostrado estar relacionados con el rendimiento, son comprensibles para los entrenadores y pueden utilizarse para obtener un *feedback* objetivo de los deportistas. Además, son parámetros que proporcionan información sobre cómo el atleta debe cambiar su forma de esquiar para mejorar.

Tabla 8. Definición de los parámetros de rendimiento seleccionados

Nombre	Definición	Cómo se calcula
Tiempo entre puertas	Período de tiempo transcurrido entre dos puertas consecutivas de un trazado.	$dt(G - G + 1) = t_{G+1} - t_G$
Tiempo INI	Suma de los tiempos que corresponden a la fase INI de todas las curvas comprendidas en un trazado.	$TINI = (INI\ C1 + INI\ C2 + INI\ C3 + \dots)$
Tiempo STE_{IN}	Suma de los tiempos que corresponden a la fase STE_{IN} de todas las curvas comprendidas en un trazado.	$TSTE_{IN} = (STE_{IN}\ C1 + STE_{IN}\ C2 + STE_{IN}\ C3 + \dots)$
Tiempo STE_{OUT}	Suma de los tiempos que corresponden a la fase STE_{OUT} de todas las curvas comprendidas en un trazado.	$TSTE_{OUT} = (STE_{OUT}\ C1 + STE_{OUT}\ C2 + STE_{OUT}\ C3 + \dots)$
Tiempo STE_{IN+OUT}	Suma de los tiempos que corresponden a la fase STE_{IN+OUT} de todas las curvas comprendidas en un trazado.	$TSTE_{IN+OUT} = (STE_{IN+OUT}\ C1 + STE_{IN+OUT}\ C2 + STE_{IN+OUT}\ C3 + \dots)$

Fase INI, fase de inicio; fase STE_{IN} , fase de conducción de entrada a la curva; fase STE_{OUT} , fase de conducción de salida de la curva; fase STE_{IN+OUT} , fase de conducción; C1, C2, C3: curva 1, 2 y 3, respectivamente; G, puerta actual; G+1, puerta siguiente.

De la teoría a la práctica: análisis de rendimiento

Se ha querido mostrar un ejemplo de un análisis real donde se comparan dos esquiadores al bajar por diferentes trazados con los parámetros de rendimiento propuestos. El análisis se ha hecho a partir de los datos del segundo estudio de la tesis, en el que se realizaron cuatro trazados de SL de diez puertas cada uno: FT, el trazado girado en la pendiente suave ($12^\circ; 10,70/4,00$ m); ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada ($21^\circ; 10,70/4,00$ m); FS, el trazado más recto en la pendiente suave ($12^\circ; 10,70/3,25$ m), y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada ($21^\circ; 10,70/3,25$ m). Todos los trazados tenían una pendiente homogénea y todas las puertas eran equidistantes.

En los ejemplos que se presentan a continuación, solo se tuvieron en cuenta los datos de dos de los esquiadores que participaron en el estudio: el esquiador que obtuvo el menor tiempo, en promedio, de las bajadas para los cuatro trazados y el esquiador que obtuvo el mayor tiempo, en promedio, de las bajadas para los cuatro trazados. Cada esquiador realizó entre cuatro y cinco bajadas por cada trazado. Para cada esquiador se ha calculado el tiempo total de cada trazado, el tiempo entre puertas de cada trazado y los tiempos parciales de las fases de la curva de esquí de cada trazado.

Tiempo total

El tiempo total establece el *ranking* de los esquiadores para cada trazado, indicando qué esquiador ha conseguido el mejor rendimiento para dicho trazado. Por ejemplo, en la tabla 9 se muestran los tiempos totales de dos esquiadores para los cuatro trazados diferentes. Se puede apreciar que el esquiador 3 fue el que obtuvo menores tiempos en todos los trazados, lo que nos indica que su rendimiento final fue mejor que el esquiador 4, que obtuvo mayores tiempos. Ahora bien, una vez obtenemos esta información,

8. Aplicaciones prácticas

todavía hay muchos interrogantes que los entrenadores se pueden hacer: ¿Dónde ha ganado el esquiador 3 la carrera? ¿Hay una sección en concreto que haya permitido ganar la carrera al esquiador 3, o ha ganado en todas las secciones? ¿Por qué el esquiador 3 ha obtenido mejores tiempos que el esquiador 4? ¿Qué hace diferente a un esquiador del otro? ¿Qué debe hacer el esquiador 4 para mejorar?

Tabla 9. Tiempos totales de cada esquiador por cada trazado

	Esquiador 3			Esquiador 4		
	Promedio (s)	±	SD	Promedio (s)	±	SD
FT	8,382	±	0,167	8,908	±	0,233
ST	8,624	±	0,188	8,796	±	0,178
FS	7,44	±	0,106	7,97	±	0,145
SS	7,97	±	0,127	8,34	±	0,234

Promedio \pm SD de los tiempos totales de las bajadas por los diferentes trazados. FT, el trazado girado en la pendiente suave; ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada; FS, el trazado más recto en la pendiente suave, y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada.

Tiempo entre puertas

En este apartado se presenta, para cada trazado (FT, ST, FS y SS), el tiempo total fraccionado en los tiempos entre puertas. Como todos los trazados tenían diez puertas, se han dividido en nueve secciones cada uno (sección 1: puerta 1- puerta 2, sección 2: puerta 2- puerta 3, sección 3: puerta 3- puerta 4, y así sucesivamente) (figuras 39-42). El tiempo entre puertas permite observar si hay alguna sección del trazado donde haya más diferencias entre los esquiadores analizados.

Para los dos esquiadores, los datos presentados se corresponden al promedio de las bajadas realizadas por un mismo trazado y la SD. Además, se ha añadido el promedio del grupo a fin de establecer una línea base que permita separar los esquiadores cuyos tiempos son inferiores al promedio —aquellos cuyo rendimiento estaría por encima del grupo— y los esquiadores que han obtenido tiempos superiores al promedio —aquellos cuyo rendimiento sería inferior al del grupo—.

De forma global, se puede apreciar que el esquiador 3 ha mantenido sus tiempos por debajo del promedio del grupo en casi todas las secciones de todos los trazados. En cambio, los tiempos del esquiador 4 han sido más elevados que el promedio del grupo en casi todas las secciones analizadas, siendo el trazado FT donde se hallan las diferencias más destacables y el trazado ST donde se minimizan dichas diferencias.

Si se observa con detalle se puede apreciar que, en las dos primeras secciones de prácticamente todos los trazados, el esquiador 3 y el 4 están muy igualados. Es a partir de la tercera sección donde se hacen evidentes las diferencias entre esquiadores. Concretamente, en el trazado ST, en las primeras tres secciones, el esquiador 4 ha estado muy igualado e incluso por debajo de los tiempos promedio del grupo, mostrando un mejor

8. Aplicaciones prácticas

rendimiento que el esquiador 3. Por otro lado, también se puede observar la dinámica que se ha generado en cada trazado. En los trazados ubicados en la pendiente suave (FT y FS), la dinámica es que el tiempo entre puertas vaya aumentando progresivamente, mostrando una tendencia a que los tiempos vuelvan a bajar en las últimas secciones para el trazado FT. Por otro lado, los trazados ubicados en la pendiente más pronunciada (ST y SS) han tendido a ir reduciendo el tiempo entre puertas.

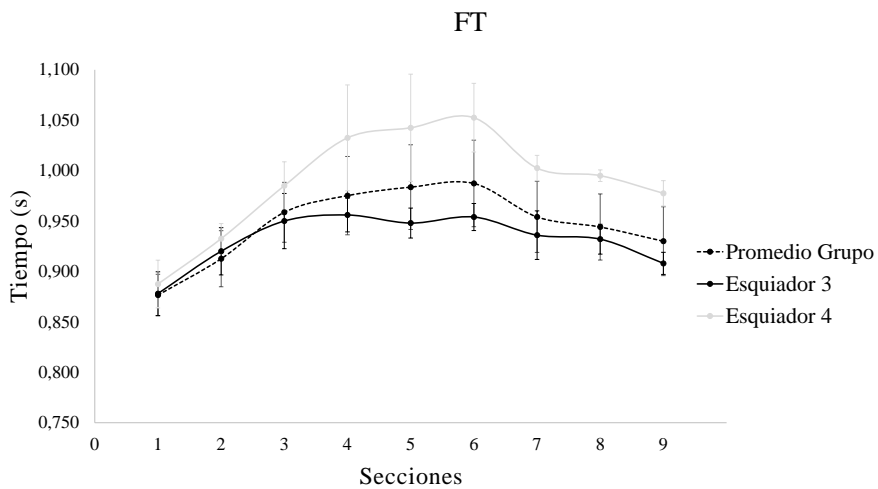


Figura 39. FT, el trazado girado en la pendiente suave.

8. Aplicaciones prácticas

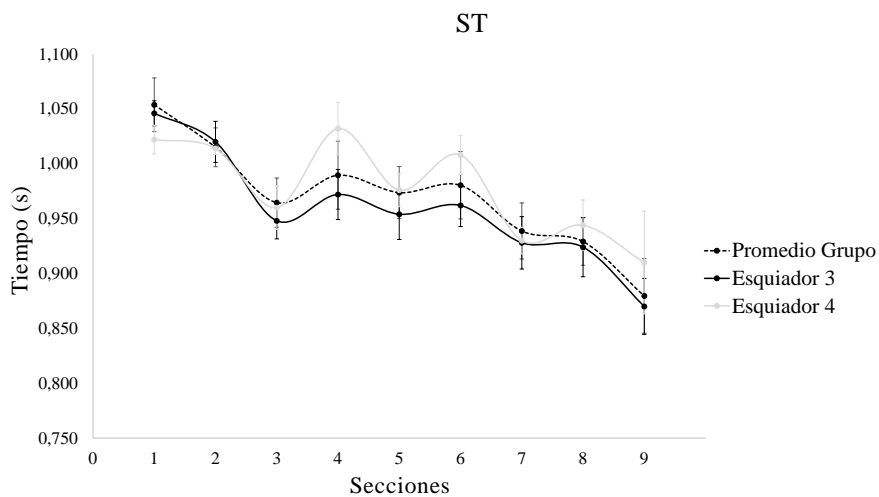


Figura 40. ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada.

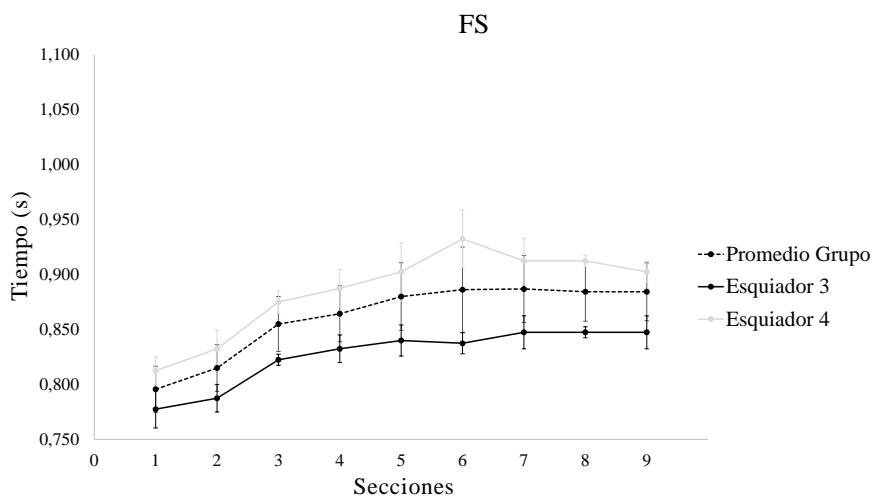


Figura 41. FS, el trazado más recto en la pendiente suave.

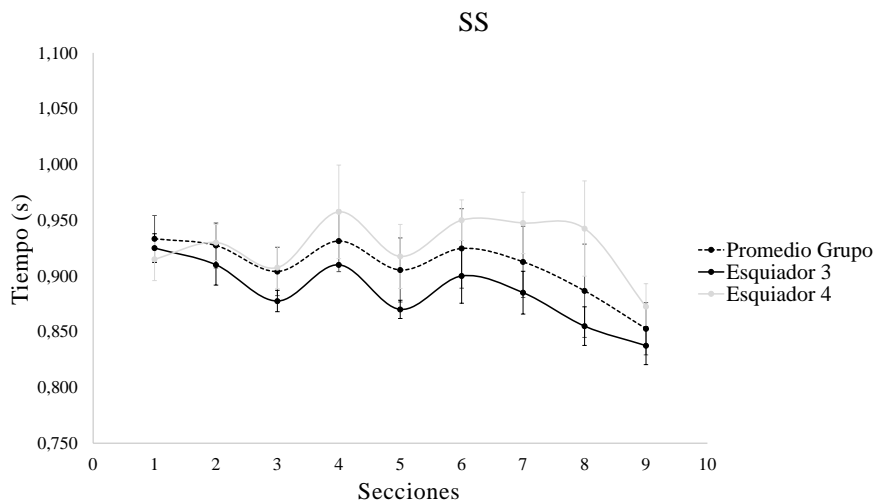


Figura 42. SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada.

Tiempos parciales de las fases de la curva de esquí

Una bajada por un trazado se compone de multitud de curvas de esquí. A su vez, las curvas —o los virajes— se componen de varias fases. Si sumamos todos los tiempos que corresponden a una misma fase, podemos fraccionar el tiempo total en tiempos parciales de las fases de la curva de esquí. En este apartado se presenta, para cada esquiador, los tiempos parciales de las fases de la curva de esquí en cada trazado (FT, ST, FS y SS). Aunque el rendimiento sea multifactorial, este es uno de los factores que da una explicación de por qué el esquiador 3 ha obtenido mejores tiempos que el esquiador 4. A partir de aquí, corresponderá a los entrenadores y entrenadoras diseñar ejercicios y metodologías para mejorar estos aspectos.

En la figura 43 se describen las fases de la curva que se han obtenido a través del M-BTS y del acelerómetro del IMU:

8. Aplicaciones prácticas

- Fase INI ($a \rightarrow b$): Período de tiempo de la curva de esquí en el que la aceleración lateral del tronco del esquiador fluctúa en torno al valor cero.
- Fase STE_{IN} ($b \rightarrow G$): Período de tiempo de la curva de esquí que queda delimitado entre el inicio de la fase STE y la puerta (G).
- Fase STE_{OUT} ($G \rightarrow c$): Período de tiempo de la curva de esquí que queda delimitado entre la puerta (G) y el final de la fase STE.
- Fase STE o también denominada STE_{IN+OUT} ($b \rightarrow c$): Período de tiempo de la curva de esquí en el que se produce el pico máximo de la aceleración lateral de la pelvis del esquiador. Esta fase queda delimitada por los puntos cero más cercanos a cada lado del pico de aceleración.

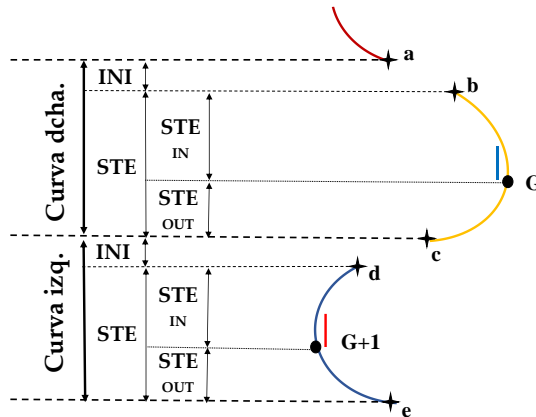


Figura 43. INI, fase de inicio; STE, fase de conducción; STE_{IN} , fase de conducción de entrada a la curva, y STE_{OUT} , fase de conducción de salida de la curva.

Todas estas fases de la curva descritas en base a criterios cinemáticos objetivos dan lugar a los siguientes tiempos parciales: tiempo INI, tiempo STE_{IN} , tiempo STE_{OUT} y tiempo STE_{IN+OUT} , que se expresan en porcentajes relativos al tiempo total. A continuación se muestran los resultados para el esquiador 3 y el esquiador 4 (figura 44).

8. Aplicaciones prácticas

Como se puede observar, el esquiador 3 ha conseguido un mayor tiempo INI, aproximadamente un 10 % más que el esquiador 4 en todos los trazados, a excepción del trazado ST, donde ambos están muy igualados.

Tal y como se ha comentado en el estudio 2 de esta tesis, a través de la fase INI, el CdM aumenta la velocidad hasta alcanzar la máxima velocidad cerca del inicio de la fase STE_{IN} (6). Si hiciéramos una analogía con el mundo del motor, la fase INI de las curvas de esquí sería como pisar el acelerador. Por lo tanto, este sería un posible factor que explicaría por qué el esquiador 3 ha obtenido mejores resultados que el esquiador 4.

En referencia al tiempo STE_{IN} , ambos esquiadores han tenido resultados muy igualados. Sin embargo, en los trazados ubicados en la pendiente suave (FT y FS), el esquiador 3 ha sabido reducir el tiempo STE_{IN} con respecto al esquiador 4. Esto seguramente le ha favorecido, ya que la fase STE_{IN} es una fase de conducción de la curva donde se produce rozamiento con la nieve (3,30) y, por tanto, disipación de la energía. Un aumento en la disipación de la energía tendrá más repercusión en una pendiente suave, ya que la energía potencial disponible por curva es menor (3) y se tarda más en recuperar la velocidad perdida (30,40), por lo que la afectación al resultado de la carrera es mayor (19,30,32,40). Otra diferencia que se observa con respecto al tiempo STE_{IN} está en el trazado ST, donde el esquiador 4 ha logrado un menor tiempo en comparación con el esquiador 3.

El tiempo STE_{OUT} ha sido uno de los tiempos que mayores diferencias ha comportado entre esquiadores. El esquiador 3 ha logrado reducir este tiempo aproximadamente entre un 10 y un 12 % en todos los trazados, sobre todo en los trazados más rectos (FS y SS), lo que muestra una mayor capacidad de adaptación a los diferentes contextos. En cambio, para el esquiador 4, los tiempos STE_{OUT} han sido mayores en todos los trazados, especialmente en el trazado FT. Este es claramente un aspecto a mejorar,

8. Aplicaciones prácticas

ya que, durante la fase STE_{OUT} de las curvas, el sistema esquiador-esquí se dirige fuera de la línea de máxima pendiente (21), lo que sería equivalente a pisar el freno en un vehículo a motor. En un trazado ubicado en una pendiente suave, como el trazado FT, pisar el freno equivale a una pérdida de velocidad que será muy difícil de recuperar, por lo que se debe intentar reducir este tiempo al máximo.

Finalmente, el tiempo STE_{IN+OUT} es un reflejo de los tiempos STE_{IN} y STE_{OUT} , que, tal y como es de esperar, han sido menores para el esquiador 3, siendo el trazado ST donde mayores tiempos STE_{IN+OUT} se han obtenido. En el esquiador 4 se aprecia un aumento desproporcionado de este tiempo en el trazado FT.

8. Aplicaciones prácticas

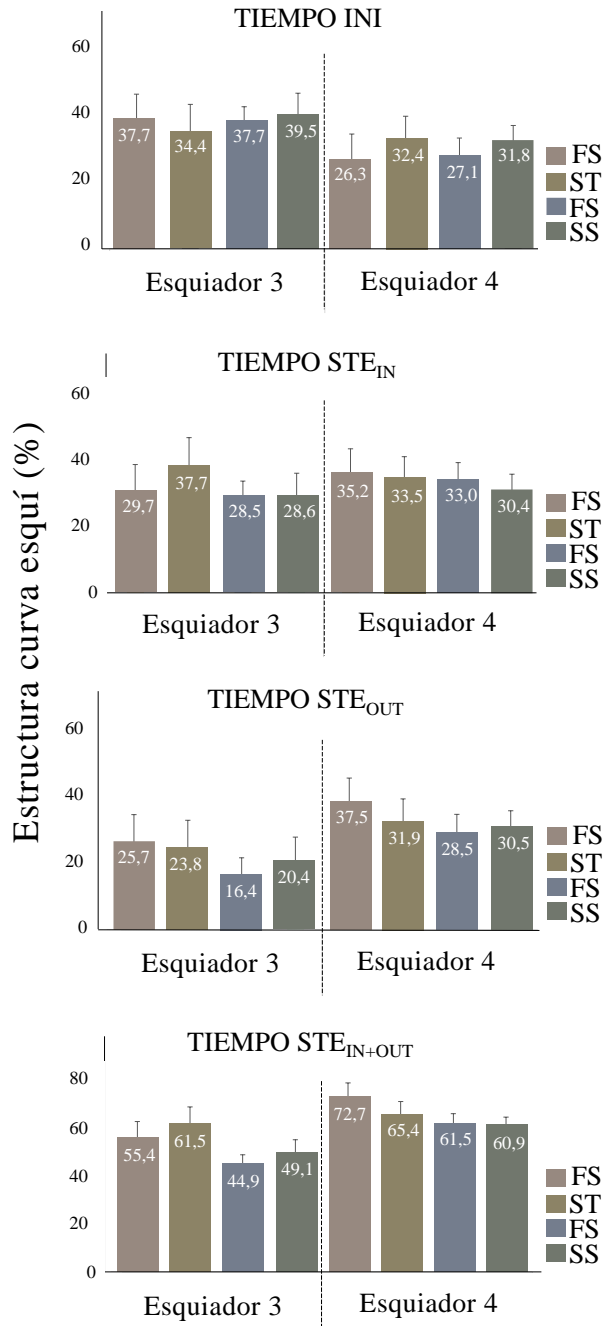


Figura 44. FT, el trazado girado en la pendiente suave; ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada; FS, el trazado más recto en la pendiente suave, y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada.

8. Aplicaciones prácticas

En conclusión, tanto el tiempo entre puertas como el tiempo de las diferentes fases de la curva, son parámetros que ayudaran a los entrenadores y entrenadoras a detectar esas pequeñas diferencias imperceptibles a simple vista pero que pueden ser decisivas en una carrera. En el ejemplo basado en los datos de los dos esquiadores, hemos podido observar como ambos esquiadores están muy igualados en las primeras puertas del trazado y es a partir de la tercera y cuarta puerta dónde se acentúan dichas diferencias. En cuanto a los tiempos parciales de las fases de las curvas, se observa que el esquiador 3 tendría que intentar reducir el tiempo STE_{IN} , especialmente en trazados como el ST, de pendiente pronunciada y girados. El esquiador 4, en cambio, tendría que centrarse en mejorar en los trazados de pendiente suave tanto girados como rectos (FT y FS), concretamente debería trabajar para aumentar el tiempo INI y reducir el tiempo STE_{IN+OUT} , sobre todo, el tiempo STE_{OUT} en trazados como el FT, de pendiente suave y girados. Les corresponde a los entrenadores y entrenadoras interpretar esta información y diseñar las estrategias que deberán seguir los y las deportistas para mejorar estos aspectos.

9. Limitaciones y perspectivas de futuro

Se pueden señalar varias limitaciones de este trabajo. Las diferentes publicaciones incluidas en la tesis discuten la mayoría de estas condiciones y deben ser consideradas a la hora de interpretar los resultados. Estas se recordarán en este capítulo, ya que también se presentan como sugerencias y opciones de investigación para el futuro.

En primer lugar, la autora quiere destacar la importancia de haber podido obtener una muestra de cinco esquiadores alpinos de élite pertenecientes al máximo nivel nacional andorrano. En la mayor parte de las investigaciones realizadas en el ámbito del esquí alpino donde han participado deportistas de élite, son comunes los estudios con un diseño de un solo sujeto, es decir, estudios de caso, y son pocos los estudios que superen el tamaño de la muestra conseguido. Además, también se considera necesario destacar que, aunque la muestra de esquiadores fue reducida y esto limita la generalización de los resultados del estudio, se analizaron un total de 77 bajadas (616 curvas). Ahora bien, en lo estadístico, para no desvirtuar los resultados, la unidad de análisis fue el esquiador y las bajadas fueron tratadas como medidas repetidas. En un futuro, sería interesante poder contar con una muestra mayor de esquiadores y añadir al estudio esquiadores de la copa del mundo.

En segundo lugar, los estudios realizados se llevaron a cabo en la prueba de SL. El motivo principal fue conseguir medir un mayor número de curvas en un espacio más reducido. No obstante, también sería interesante analizar si se encontrarían resultados similares en las demás pruebas, como el GS, el SG y el DH. Además, los trazados analizados en el segundo estudio de esta tesis fueron homogéneos y rítmicos, con puertas equidistantes y terrenos lo más uniformes posible en cuanto a la pendiente. Este montaje experimental

9. Limitaciones y perspectivas de futuro

se diseñó para poder comparar los trazados entre ellos. No obstante, en una competición, las bajadas serían mucho más heterogéneas en las pendientes, los ritmos y la configuración del trazado. Aun así, los trazados que se eligieron cumplían con las reglamentaciones de la FIS y, tanto las pendientes (12° y 21°) como las trayectorias elegidas (10,7/4 m y 10,7/3,25 m), son condiciones que suelen darse en competición. En un futuro sería interesante analizar trazados con pendientes cambiantes y diferentes secuencias de puertas, de manera que las condiciones se asemejaran más a las de una competición real.

En tercer lugar, en el contexto del esquí alpino, el sistema propuesto no puede utilizarse para obtener un *feedback* en tiempo real. Sin embargo, el sistema podría adaptarse para obtener información directamente después de cada bajada. Utilizando sensores inerciales capaces de descargar sus datos a través de Bluetooth, el atleta podría descargar los datos de cada bajada en su *smartphone*, donde podrían procesarse *in situ* o enviarse a la nube. Los resultados relativos al análisis del rendimiento estarían disponibles para el deportista y el entrenador solo unos segundos después. Hasta el momento es necesario tratar los datos *a posteriori* con la utilización del *software* SPRO y rutinas de MATLAB que automaticen gran parte del procesamiento de los datos. En este sentido, cabe destacar que los algoritmos desarrollados en el *software* SPRO están pensados para la medición de parámetros específicos de los deportes colectivos. El esquí es un deporte de deslizamiento con unas singularidades diferentes a los de estos deportes, por lo que el *software* de análisis debería ampliarse para automatizar más el postprocesamiento. En relación con este punto, también es fundamental encontrar formas inteligentes de resumir los datos registrados y presentar los resultados de forma intuitiva e interpretable para los entrenadores. Cuando se supere la limitación de obtener los datos en tiempo real, la sencilla aplicación de estos sistemas, sobre todo en un

9. Limitaciones y perspectivas de futuro

contexto tan singular como el del esquí, facilitará que se utilicen ampliamente, no solo en el ámbito de la investigación sino también en los entrenamientos en las pistas, a fin de complementar el análisis y el *feedback* de los entrenadores.

En cuarto lugar, la presente tesis ha estudiado la estructura de la curva de esquí y su influencia en el rendimiento. Sin embargo, este es un factor biomecánico aislado y, dado que el rendimiento es multifactorial, sería necesario complementar con otros factores biomecánicos, como la velocidad de entrada y de salida de la curva, el espacio recorrido por el esquiador y la energía de disipación producida en cada fase de la curva. Dado que el M-BTS puede utilizarse para seccionar las series temporales de los otros sensores integrados en el dispositivo IMU, como el giroscopio o el receptor GNSS, esto podría ayudar a estimar los parámetros cinemáticos mencionados.

Una línea de investigación futura muy prometedora, por ejemplo, será la combinación del dispositivo IMU y el M-BTS con los datos de un vuelo fotogramétrico con dron. Esta combinación, aparte de proporcionar información de la geomorfología del terreno, también puede servir para mejorar la exactitud y precisión de los datos registrados por el GNSS *low-end* del dispositivo IMU y determinar la trayectoria 3D de los esquiadores.

En quinto lugar, otra de las aplicaciones futuras será la inclusión de análisis no lineales del movimiento humano en esquiadores. Con la utilización del dispositivo IMU y mediante el análisis de la estructura de la señal de aceleración, se pueden aplicar análisis no lineales como la entropía que nos ayudará a complementar la información extraída hasta el momento mediante análisis lineales, dándonos información sobre la variabilidad de movimiento de los esquiadores en las diferentes situaciones altamente dinámicas e impredecibles de entrenamiento y competición. La variabilidad

9. Limitaciones y perspectivas de futuro

del movimiento nos dará información del grado de maestría, adaptabilidad y entrenabilidad de los deportistas y permitirá tomar decisiones para la optimizar el tiempo en los entrenamientos.

Todos los deportes progresan con la aplicación de las nuevas tecnologías. Los directores y la autora de esta tesis estamos convencidos de que, en un futuro, los sistemas y las metodologías aquí desarrollados se podrán adaptar para analizar deportes de características similares, como el *snowboard*, el esquí de montaña o el esquí de fondo. Esperamos que este trabajo sirva como punto de partida a ese fin y que ayude a plantear nuevos retos que hagan avanzar al esquí alpino y a los otros deportes de invierno.

10. Referencias

1. Gilgien M, Reid R, Raschner C, Supej M, Holmberg H-C. The Training of Olympic Alpine Ski Racers. *Front Physiol.* 2018;9(1772):1–7.
2. Raschner C, Hildebrandt C, Mohr J, Müller L. Sex Differences in Balance Among Alpine Ski Racers: Cross-Sectional Age Comparisons. *Percept Mot Skills.* 2017;0(0):1–17.
3. Supej M. Differential Specific Mechanical Energy as a Quality Parameter in Racing Alpine Skiing. *J Appl Biomech.* 2008;24(2):121–9.
4. Boutin RD, Fritz RC. MRI of snow skiing and snowboarding injuries. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2005;9(4):360–78.
5. FIS Calendar & Results [Internet]. Beijing (CHN): Olympic Winter Games. 2022 [consultado el 8 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.fis-ski.com/DB/general/event-details.html?sectorcode=AL&eventid=49141&seasoncode=2022>
6. Reid RC. A kinematic and kinetic study of alpine skiing technique in slalom. Norwegian School of Sport Sciences; 2010.
7. Gilgien M, Spörri J, Kröll J, Crivelli P, Müller E. Mechanics of turning and jumping and skier speed are associated with injury risk in men’s World Cup alpine skiing: A comparison between the competition disciplines. *Br J Sports Med.* 2014;48(9):742–7.

8. Gilgien M, Crivelli P, Spörri J, Kröll J, Müller E. Characterization of Course and Terrain and Their Effect on Skier Speed in World Cup Alpine Ski Racing. *PLoS One*. 2015;10(3):1–25.
9. Gilgien M. Characterisation of Skiers' Mechanics, Course Setting and Terrain Geomorphology in World Cup Alpine Skiing using Global Navigation Satellite Systems. Injury Risk, Performance and Methodological Aspects. Norwegian School of Sport Sciences; 2014.
10. International Ski Federation. The International Ski Competition Rules (ICR) Book IV Joint Regulations for Alpine Skiing. Oberhofen, Switzerland: International Ski Federation FIS; 2019. 1–128 p.
11. FIS International Ski Competition Rules ICR [Internet]. 2020 [consultado el 13 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.fis-ski.com/en/inside-fis/document-library/alpine-documents#9a7d11be565ad65858070c99>
12. Supej M, Holmberg H, Reid RC. Recent Kinematic and Kinetic Advances in Olympic Alpine Skiing : Pyeongchang and Beyond. *Front Physiol*. 2019;10(111):1–7.
13. Hébert-Losier K, Supej M, Holmberg H-C. Biomechanical Factors Influencing the Performance of Elite Alpine Ski Racers. *Sport Med*. 2014;44:519–33.
14. Gómez-López PJ. Análisis Biomecánico de la técnica del viraje de slalom en el esquí alpino. Universidad de Granada; 2002.

15. Nachbauer W. Fahrlinie in Torlauf und Riesentorlauf. *Leistungssport*. 1987;6:17–21.
16. Müller E. Analysis of the biomechanical characteristics of different swinging techniques in alpine skiing. *J Sports Sci*. 1994;12(3):261–78.
17. Raschner C. Kinematische und dynamische Technikanalyse im Slalom als Grundlage für die Entwicklung skispezifischer Krafttrainingsgeräte und Krafttrainingsmethoden. University of Salzburg; 1997.
18. Vaverka F, Vodickova S, Elfmark M. Kinetic analysis of ski turns based on measured ground reaction forces. *J Appl Biomech*. 2012;28(1):41–7.
19. Spörri J, Kröll J, Schwameder H, Müller E. Turn characteristics of a top world class athlete in giant slalom: A case study assessing current performance prediction concepts. *Int J Sport Sci Coach*. 2012;7(4):647–59.
20. Müller E, Schwameder H. Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *J Sport Sci*. 2003;21(9):679–692.
21. Müller E, Bartlett R, Raschner C, Schwameder H, Benko-Bernwick U, Lindinger S. Comparisons of the ski turn techniques of experienced and intermediate skiers. *J Sports Sci*. 1998;16(6):545–59.

22. Supej M, Holmberg H-C. How gate setup and turn radii influence energy dissipation in slalom ski racing. *J Appl Biomech.* 2010;26(4):454–64.
23. Falda-Buscaiot T, Hintzy F, Rougier P, Lacouture P, Coulmy N. Influence of slope steepness, foot position and turn phase on plantar pressure distribution during giant slalom alpine ski racing. *PLoS One.* 2017;12(5).
24. Supej M, Nemec B. Kinematic determination of the beginning of a ski turn. *Kinesiol Slov.* 2003;9(1):11–7.
25. Martínez A, Jahnel R, Buchecker M, Snyder C, Brunauer R, Stöggl T. Development of an Automatic Alpine Skiing Turn Detection Algorithm Based on a Simple Sensor Setup. *Sensors.* 2019;19(902):1–12.
26. Martínez A, Snyder C, Moore SR, Stöggl T. A comprehensive comparison and validation of published methods to detect turn switch during alpine skiing. *Sensors.* 2021;21(2573):1–15.
27. Martínez A, Nakazato K, Scheiber P, Snyder C, Stöggl T. Comparison of the Turn Switch Time Points Measured by Portable Force Platforms and Pressure Insoles. *Front Sport Act Living.* 2020;2(2):1–7.
28. Martínez A, Brunauer R, Venek V, Snyder C, Jahnel R, Buchecker M, et al. Development and Validation of a Gyroscope-Based Turn Detection Algorithm for Alpine Skiing in the Field. *Front Physiol.* 2019;1(18):1–9.

10. Referencias

29. Ruiz-García I, Navarro-Marchal I, Ocaña-Wilhelmi J, Palma AJ, Gómez-López PJ, Carvajal MA. Development and evaluation of a low-drift inertial sensor-based system for analysis of alpine skiing performance. *Sensors*. 2021;21(7).
30. Supej M, Kipp R, Holmberg H. Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing. *Scand J Med Sci Sport*. 2011;21(6):72–81.
31. Brodie M, Walmsley A, Page W. Fusion motion capture : a prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing. *Sport Technol*. 2008;1(1):17–28.
32. Spörri J, Kröll J, Schwameder H, Müller E. The role of path length- and speed-related factors for the enhancement of section performance in alpine giant slalom. *Eur J Sport Sci*. 2018;18(7):911–9.
33. Federolf PA. Quantifying instantaneous performance in alpine ski racing. *J Sports Sci*. 2012;30(10):1063–8.
34. Chardonnens J, Favre J, Cuendet F, Gremion G, Aminian K. Measurement of the dynamics in ski jumping using a wearable inertial sensor-based system. *J Sports Sci*. 2014;32(6):591–600.
35. Vaverka F, Vodickova S. Laterality of the lower limbs and carving turns. *Biol Sport*. 2010;27(2):129–34.

36. Bruhin B, Janssen RJF, Guillaume S, Gander M, Oberle F, Lorenzetti S, *et al.* Giant Slalom: Analysis of Course Setting, Steepness and Performance of Different Age Groups — A Pilot Study. *Front Sport Act Living*. 2020;2(August):1–12.
37. Pérez-Chirinos Buxadé C, Padullés Riu JM, Gavaldà Castet D, Trabucchi M, Fernández-Valdés B, Tuyà Viñas S, *et al.* Influence of Turn Cycle Structure on Performance of Elite Alpine Skiers Assessed through an IMU in Different Slalom Course Settings. *Sensors*. 2022;22(902):1–14.
38. Reid RC, Haugen P, Gilgien M, Kipp RW, Smith GA. Alpine Ski Motion Characteristics in Slalom. *Front Sport Act Living*. 2020;2(25):1–11.
39. Klous M, Müller E, Schwameder H. Collecting kinematic data on a ski/snowboard track with panning, tilting, and zooming cameras: is there sufficient accuracy for a biomechanical analysis? *J Sport Sci*. 2010;28(12):1345–1353.
40. Supej M, Hébert-losier K, Holmberg H. Impact of the Steepness of the Slope on the Biomechanics of World Cup Slalom Skiers. *Int J Sports Physiol Perform*. 2015;10:361–8.
41. Gómez-López PJ, Gutiérrez-Dávila M, Soto-Hermoso VM. Análisis biomecánico de la técnica individual del viraje en esquí alpino de competición. *Biomecánica*. 2002;10(1).
42. Fasel B, Spörri J, Gilgien M, Boffi G, Chardonens J, Müller E, *et al.* Three-Dimensional Body and Centre of Mass Kinematics in Alpine Ski Racing Using Differential GNSS and Inertial Sensors. *Remote Sens*. 2016;8(671):1–13.

43. Fasel B, Spörri J, Gilgien M, Gerber N, Falbriard M, Müller E, *et al.* IMU and GNSS-based Turn Switch Detection in Alpine Ski Racing. In: Science and Skiing VII, Proceedings of the 7th International Congress on Science and Skiing. St. Christoph/Arlberg, Austria; 2016. p. 86–92.
44. Gilgien M, Kröll J, Spörri J, Crivelli P, Müller E. Application of dGNSS in Alpine Ski Racing : Basis for Evaluating Physical Demands and Safety. *Front Physiol.* 2018;9(145):1–11.
45. Supej M, Spörri J, Holmberg H-C. Methodological and Practical Considerations Associated With Assessment of Alpine Skiing Performance Using Global Navigation Satellite Systems. *Front Sport Act Living.* 2020;1(74):1–7.
46. Yu G, Jae Jang Y, Kim J, Kim JH, Kim HY, Kim K, *et al.* Potential of IMU Sensors in Performance Analysis of Professional Alpine Skiers. *Sensors.* 2016;16(463):1–21.
47. Schwameder H, Nigg BM, Tscharnner V, Stefanyshyn D. The effect of binding position on kinetic variables in alpine skiing. In: Müller E, editor. 2nd International Congress on Skiing and Science. St. Christoph am Arlberg, Kovacs, Hamburg, Germany; 2001. p. 43–54.
48. Yamagiwa S, Ohshima H, Shirakawa K. Skill scoring system for ski's parallel turns. In: icSPORTS 2014 - Proceedings of the 2nd International Congress on Sports Sciences Research and Technology Support. Rome, Italy; 2014. p. 121–8.

49. Ogrin J, Šarabon N, Madsen MK, Kersting U, Holmberg H-C, Supej M. Asymmetries in Ground Reaction Forces During Turns by Elite Slalom Alpine Skiers Are Not Related to Asymmetries in Muscular Strength. *Front Physiol.* 2021;12(431):1–11.
50. LeMaster R. *Ultimate Skiing*. Plotzke L, Eastin-Allen M, Podeschi L, editors. Champaign, IL, USA: Human Kinetics; 2010. 1–211 p.
51. Lind D, Sanders SP. *The Physics of Skiing: Skiing at the Triple Point*. 2nd ed. New York: Springer- Verlag New York, Inc; 1996. 1–265 p.
52. Spörri J. *Biomechanical aspects of performance enhancement and injury prevention in alpine ski racing*. University of Salzburg; 2012.
53. Supej M, Sætran L, Oggiano L, Ettema G, Šarabon N, Nemeč B, *et al.* Aerodynamic drag is not the major determinant of performance during giant slalom skiing at the elite level. *Scand J Med Sci Sport.* 2013;23:38–47.
54. Kiefmann A, Krinninger M, Lindemann U, Senner V, Spitzenpfeil P. *A New Six Component Dynamometer for Measuring Ground Reaction Forces in Alpine Skiing*. 2 ed. Moritz EF, Haake S, editors. *The Engineering of Sport 6*. New York: Springer; 2006. 87–92 p.
55. Supej M, Kugovnik O, Nemeč B. New advances in racing slalom technique. *Kinesiol Slov.* 2002;8(1):25–9.
56. Supej M, Kugovnik O, Nemeč B. Modelling and simulation of two competition slalom techniques. *Kinesiology.* 2004;36(2):119–30.

57. Chardonnens J, Favre J, Gremion G, Aminian K. A New Method for Unconstrained Measurement of Knee Joint Angle and Timing in Alpine Skiing : Comparison of Crossover and Crossunder Turns. In: Proceedings of the 28th Conference of the International Society on Biomechanics in Sports. 2010. p. 180–3.
58. Nakazato K, Scheiber P, Müller E. A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *J Sport Sci Med*. 2011;10(4):754–62.
59. Howe J. *Skiing Mechanics*. Laporte, Colorado: Poudre Press; 1983. 160 p.
60. Burtscher M, Gatterer H, Flatz M, Sommersacher R, Woldrich T, Ruedl G, et al. Effects of modern ski equipment on the overall injury rate and the pattern of injury location in alpine skiing. *Clin J Sport Med*. 2008;18(4):355–7.
61. Lešnik B, Žvan M. The Best Slalom Competitors - Kinematic Analysis of Tracks and Velocities. *Kinesiol Int J Fundam Appl Kinesiol*. 2007;39(1):40–8.
62. Supej M, Holmberg H-C. A new time measurement method using a high-end global navigation satellite system to analyze alpine skiing. *Res Q Exerc Sport*. 2011;82(3):400–11.
63. Supej M, Ogrin J, Šarabon N, Holmberg HC. Asymmetries in the technique and ground reaction forces of elite alpine skiers influence their slalom performance. *Appl Sci*. 2020;10(20):1–16.

64. Snyder C, Martínez A, Jahnel R, Roe J, Stöggl T. Connected skiing: Motion quality quantification in alpine skiing. *Sensors*. 2021;21(3779):1–13.
65. Spörri J, Kröll J, Schwameder H, Schiefermüller C, Müller E. Course setting and selected biomechanical variables related to injury risk in alpine ski racing: An explorative case study. *Br J Sports Med*. 2012;46(15):1072–7.
66. Gilgien M, Crivelli P, Kröll J, Luteberget LS, Müller E, Spörri J. Injury prevention in Super-G alpine ski racing through course design. *Sci Rep*. 2021;11(1):1–7.
67. Erdmann WS, Giovanis V, Aschenbrenner P, Kiriakis V, Suchanowski A. Methods for acquiring data on terrain geomorphology, course geometry and kinematics of competitors' runs in alpine skiing: A historical review. *Acta Bioeng Biomech*. 2017;19(1):69–79.
68. De Berg M, Cheong O, Van Kreveld M, Overmars M. Delaunay Triangulations Height Interpolation. In: *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Third Edit. Springer; 2008. p. 191–215.
69. Supej M, Holmberg H-C. Monitoring the Performance of Alpine Skiers with Inertial Motion Units: Practical and Methodological Considerations. *J Sci Sport Exerc*. 2021;3:249–256.

70. Fasel B, Gilgien M, Spörri J, Aminian K. A New Training Assessment Method for Alpine Ski Racing: Estimating Center of Mass Trajectory by Fusing Inertial Sensors With Periodically Available Position Anchor Points. *Front Physiol.* 2018;9(1203):1–11.
71. Federolf PA. Finite Element Simulation of a Carving Snow Ski. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zürich, Switzerland; 2005.
72. Supej M, Kugovnik O, Nemec B. Relations among performance quality (DW), ground reaction forces, acceleration and turn radii in men WC slalom races. In: Milanovic D, Prot F, editors. Fourth International Scientific Conference on Kinesiology “Science and Profession: Challenge for the Future.” Opatija, Croatia; 2005. p. 829–832.
73. Brierley H, Bartlett R. A three-dimensional video analysis of the kinematic differences between experienced and novice skiers performing two types of parallel ski turn. *J Sport Sci.* 1991;9(395).
74. Mössner M, Kaps P, Nachbauer W. A Method for Obtaining 3-D Data in Alpine Skiing Using Pan and Tilt Cameras with Zoom Lenses. *Ski Trauma Ski Saf.* 1996;10:1–13.
75. Nachbauer W, Kaps P, Nigg BM, Brunner F, Lutz A, Obkircher G, *et al.* A Video Technique for Obtaining 3-D Coordinates in Alpine Skiing. *J Appl Biomech.* 1996;12:104–15.
76. Pozzo R, Canclini A, Cotelli C, Baroni G. 3-D Kinematic and Kinetic Analysis of G-Slalom at Valbadia Cup-Race in 2002. *Sci Ski III.* 2004;(January):169–71.

77. Spörri J, Schiefermüller C, Müller E. Collecting Kinematic Data on a Ski Track with Optoelectronic Stereophotogrammetry: A Methodological Study Assessing the Feasibility of Bringing the Biomechanics Lab to the Field. *PLoS One*. 2016;11(8):1–12.
78. Pourcelot P, Audigié F, Degueurce C, Geiger D, Denoix JM. A method to synchronise cameras using the direct linear transformation technique. *J Biomech*. 2000;33(12):1751–4.
79. Abdel-Aziz YI, Karara HM. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Photogramm Eng Remote Sensing*. 2015;81(2):103–7.
80. Kaps P, Nachbauer W, Mössner M. Snow Friction and Drag in Alpine Downhill Racing. In: 4th World Congress of Biomechanics. 2002. p. 1–3.
81. Lüthi A, Federolf P, Fauve M, Oberhofer K, Rhyner HU, Ammann W, et al. Determination of forces in carving using three independent methods. *Sci Ski*. 2005;III:96–106.
82. Cappozzo A, Della Croce U, Leardini A, Chiari L. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 1: Theoretical background. *Gait Posture*. 2005;21(2):186–96.
83. Fasel B, Spörri J, Schütz P, Lorenzetti S, Aminian K. An Inertial Sensor-Based Method for Estimating the Athlete's Relative Joint Center Positions and Center of Mass Kinematics in Alpine Ski Racing. *Front Physiol*. 2017;8(850):1–11.

84. Karboviak RJ. Using GPS technology to monitor intensity, speed, and training volume in outdoor athletes. *Strength Cond J*. 2005;27:24–5.
85. Larsson P. Global positioning system and sport-specific testing. *Sport Med*. 2003;33(15):1093–1101.
86. Larsson P, Henriksson-Larsén K. The use of dGPS and simultaneous metabolic measurements during orienteering. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33(11):1919–1924.
87. Rodriguez DA, Brown AL, Troped PJ. Portable global positioning units to complement accelerometry-based physical activity monitors. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37(11):572–581.
88. Townshend, A. D. Worringham, C. J. Stewart IB. Assessment of speed and position during human locomotion using nondifferential GPS. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40:124–132.
89. Macfarlane T.U. S, Tannath J. S, Vincent G. K. The Validity and Reliability of Global Positioning Systems in Team Sport: A Brief Review. *J Strength Cond Res*. 2015;30(5):1470–90.
90. Supej M. 3D measurements of alpine skiing with an inertial sensor motion capture suit and GNSS RTK system. *J Sports Sci*. 2010;28(7):759–69.
91. Gilgien M, Spörri J, Kröll J, Müller E. Effect of ski geometry and standing height on kinetic energy: Equipment designed to reduce risk of severe traumatic injuries in alpine downhill ski racing. *Br J Sports Med*. 2016;50(1):8–13.

92. Kröll J, Spörri J, Gilgien M, Schwameder H, Müller E. Sidecut radius and kinetic energy: Equipment designed to reduce risk of severe traumatic knee injuries in alpine giant slalom ski racing. *Br J Sports Med.* 2016;50(1):26–31.
93. Supej M, Kugovnik O, Nemec B. DGPS measurement system in alpine skiing track and center of mass estimation. *First Jt Int Pre-Olympic Conf Sport Sci Sport Eng.* 2008;1:120–5.
94. Gilgien M, Spörri J, Chardonens J, Kröll J, Limpach P, Müller E. Determination of the centre of mass kinematics in alpine skiing using differential global navigation satellite systems. *J Sports Sci.* 2015;33(9):960–9.
95. Nemec B, Petric T, Babic J, Supej M. Estimation of Alpine Skier Posture Using Machine Learning Techniques. *Sensors.* 2014;14:18898–914.
96. Gilgien M, Spörri J, Chardonens J, Kröll J, Müller E. Determination of External Forces in Alpine Skiing Using a Differential Global Navigation Satellite System. *Sensors.* 2013;13:9821–35.
97. Gilgien M, Limpach P, Geiger A. The Effect of Different Global Navigation Satellite System Methods on Positioning Accuracy in Elite Alpine Skiing. *Sensors.* 2014;14:18433–53.
98. Waegli A, Skaloud J. Optimization of two GPS/MEMS-IMU integration strategies with application to sports. *GPS Solut.* 2009;13(4):315–26.

99. Pireaux S, Defraigne P, Wauters L, Bergeot N, Baire Q, Bruyninx C. Influence of ionospheric perturbations in GPS time and frequency transfer. *Adv Sp Res.* 2010;45(9):1101–12.
100. Perrin O, Terrier P, Ladetto Q, Merminod B, Schutz Y. Improvement of walking speed prediction by accelerometry and altimetry, validated by satellite positioning. *Med Biol Eng Comput.* 2000;38(2):164–8.
101. Gløersen Ø, Kocbach J, Gilgien M, Hoppe MW. Tracking Performance in Endurance Racing Sports: Evaluation of the Accuracy Offered by Three Commercial GNSS Receivers Aimed at the Sports Market. *Front Physiol.* 2018;9(1425):1–18.
102. Krüger A, Edelmann-Nusser J. Application of a Full Body Inertial Measurement System in Alpine Skiing : A Comparison With an Optical Video Based System. *J Appl Biomech.* 2010;26:516–21.
103. Meyer F, Borrani F. Estimating alpine skiers' energetics and turn radius using different morphological points. *Front Physiol.* 2018;9(1541):1–9.
104. Terrier P, Ladetto Q, Merminod B, Schutz Y. High-precision satellite positioning system as a new tool to study the biomechanics of human locomotion. *J Biomech.* 2000;33(2000):1717–1722.
105. Zhang Q, Ma C, Meng X, Xie Y, Psimoulis P, Wu L, et al. Galileo Augmenting GPS Single-Frequency Single-Epoch Precise Positioning with Baseline Constrain for Bridge Dynamic Monitoring. *Remote Sens.* 2019;11(438):1–20.

106. Stricker G, Scheiber P, Lindenhofer E, Müller E. Determination of forces in alpine skiing and snowboarding: Validation of a mobile data acquisition system. *Eur J Sport Sci.* 2010;10(1):31–41.
107. Klous M, Müller E, Schwameder H. Three-dimensional lower extremity joint loading in a carved Ski and snowboard turn: A pilot study. *Comput Math Methods Med.* 2014;
108. Federolf P, Scheiber P, Rauscher E, Schwameder H, Lüthi A, Rhyner H-U, et al. Impact of skier actions on the gliding times in alpine skiing. *Scand J Med Sci Sport.* 2008;18(6):790–7.
109. Nakazato K, Scheiber P, Müller E. Comparison between the force application point determined by portable force plate system and the center of pressure determined by pressure insole system during alpine skiing. *Sport Eng.* 2013;16(4):297–307.
110. Cust EE, Sweeting AJ, Ball K, Robertson S. Machine and deep learning for sport-specific movement recognition : a systematic review of model development and performance review of model development and performance. *J Sports Sci.* 2018;1–33.
111. Coutts AJ, Duffield R. Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *J Sci Med Sport.* 2010;13(1):133–5.
112. Luteberget LS, Spencer M, Gilgien M. Validity of the Catapult ClearSky T6 Local Positioning System for Team Sports Specific Drills , in Indoor Conditions. *Front Physiol.* 2018;9(115):1–10.

113. Johnston RJ, Watsford ML, Kelly SJ, Pine MJ, Spurrs RW. Validity and Interunit reliability of 10Hz and 15Hz GPS Units for Assessing Athlete Movement demands. *J Strength Cond Res.* 2014;28(6):1649–55.
114. Sato K, Smith SL, Sands WA. Validation of an Accelerometer for Measuring Sport Performance. *J Strength Cond Res.* 2009;23(1):5–9.
115. Macadam P, Cronin J, Neville J, Diewald S. Quantification of the validity and reliability of sprint performance metrics computed using inertial sensors: A systematic review. *Gait Posture.* 2019;73(July):26–38.
116. Boyd LJ, Ball K, Aughey RJ. Quantifying external load in australian football matches and training using accelerometers. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;8(1):44–51.
117. Chen KY, Bassett DR. The technology of accelerometry-based activity monitors: Current and future. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(11):490-500.
118. Umek A, Kos A, Tomažič S. SmartSKI : Application of Sensors Integrated into Sport Equipment. In: *International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things.* 2016;122–7.
119. B. Alejo L, Gil-Cabrera J, Montalvo-Pérez A, Barranco-Gil D, Hortal-Fondón J. Performance Parameters in Competitive Alpine Skiing Disciplines of Slalom , Giant Slalom and Super-Giant Slalom. *Int J Environ Res Public Health.* 2021; 18 (2628):1-11.

120. Fasel B, Spörri J, Chardonnens J, Kröll J, Müller E, Aminian K. Joint inertial sensor orientation drift reduction for highly dynamic movements. *IEEE J Biomed Heal Informatics*. 2018;22(1):77–86.
121. Benedikt F. Drift Reduction for Inertial Sensor Based Orientation and Position Estimation in the Presence of High Dynamic Variability During Competitive Skiing and Daily-Life Walking. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*; 2017.
122. Della Croce U, Leardini A, Chiari L, Cappozzo A. Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 4: Assessment of anatomical landmark misplacement and its effects on joint kinematics. *Gait Posture*. 2005;21(2):226–37.
123. Zhang JT, Novak AC, Brouwer B, Li Q. Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics. *Physiol Meas*. 2013;34(8).
124. Brodie D, Moscrip V, Hutcheon ROB. Body Composition Measurement: A Review of Hydrodensitometry, Anthropometry, and Impedance Methods. *Nutrition*. 1998;14(3):296–310.
125. Fasel B, Spörri J, Schütz P, Lorenzetti S, Aminian K. Validation of functional calibration and strap-down joint drift correction for computing 3D joint angles of knee, hip, and trunk in alpine skiing. *PLoS One*. 2017;12(7):1–17.
126. Fasel B, Spörri J, Kröll J, Müller E, Aminian K. A Magnet-Based Timing System to Detect Gate Crossings in Alpine Ski Racing. *Sensors*. 2019;19(940):1–10.

127. Pérez-Chirinos Buxadé C, Fernández-Valdés B, Morral-Yepes M, Tuyà Viñas S, Padullés Riu JM, Moras Feliu G. Validity of a Magnet-Based Timing System Using the Magnetometer Built into an IMU. *Sensors*. 2021;21(5773):1–13.
128. Fasel B, Lehot C, Spörri J, Müller E, Aminian K. Body vibration and its transmission in alpine ski racing. In: *International Symposium on 3d Analysis of Human Movement*. 2016.
129. Spörri J, Kröll J, Fasel B, Aminian K, Müller E. The Use of Body Worn Sensors for Detecting the Vibrations Acting on the Lower Back in Alpine Ski Racing. *Front Physiol*. 2017;8(522):1–9.
130. Supej M, Ogrin J. Transmissibility of whole-body vibrations and injury risk in alpine skiing. *J Sci Med Sport*. 2019;22:S71–7.
131. Supej M, Ogrin J, Holmberg HC. Whole-body vibrations associated with alpine skiing: A risk factor for low back pain? *Front Psychiatry*. 2018;9(MAR).
132. Tarabini M, Saggin B, Scaccabarozzi D. Whole-body vibration exposure in sport: four relevant cases. *Ergonomics*. 2015;58(7):1143–50.
133. Snyder C, Martinez A, Strutzenberger G, Stöggl T. Connected skiing: Validation of edge angle and radial force estimation as motion quality parameters during alpine skiing. *Eur J Sport Sci*. 2021; 19:1-9
134. Cross MR, Delhaye C, Morin J-B, Bowen M, Coulmy N, Hintzy F, et al. Force output in giant-slalom skiing: A practical model of force application effectiveness. *PLoS One*. 2021;16(1):1–22.

135. Jentschura UD, Fahrbach F. Physics of skiing: The ideal-carving equation and its applications. *Can J Phys.* 2004;82(4):249–61.
136. Schiestl M, Kaps P, Mössner M, Nachbauer W. Calculation of Friction and Reaction Forces During an Alpine World Cup Downhill Race. In: Moritz EF, Haake S, editors. *The Engineering of Sport*. 6th ed. New York, USA: Springer; 2006. p. 269–274.
137. Meyer F, Le Pelley D, Borrani F. Aerodynamic drag modeling of alpine skiers performing giant slalom turns. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(6):1109–15.
138. International Ski Federation. *Timing-Booklet Alpine Skiing*. Version 2.59 [Internet]. 2020 [consultado el 10 de febrero de 2019]. Disponible en: https://alge-timing.com/AlgeTiming_V2/files/download/Sport/FIS/Alpine-Timingbooklet-D.pdf
139. Morawski JM. Control systems approach to a ski-turn analysis. *J Biomech.* 1973;6(3):267–79.
140. Komissarov SS. Dynamics of carving runs in alpine skiing. I. The basic centrifugal pendulum. *Sport Biomech.* 2020:1-22.
141. García-Rubio J, Pino J, Olivares PR, Ibáñez SJ. Validity and reliability of the WIMUTM inertial device for the assessment of joint angulations. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(1):1–9.
142. Montgomery, P. G., Pyne, D. B., & Minahan CL. The physical and physiological demands of basketball training and competition. *Int J Sport Physiol Perform.* 2010;5(1):75–86.

143. Neuwirth C, Snyder C, Kremser W, Brunauer R, Holzer H, Stöggl T. Classification of alpine skiing styles using GNSS and inertial measurement units. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(4232):1–22.
144. International Ski Federation (FIS): Calendar & Results. AUDI FIS SKI WORLD CUP 2019/20 Madonna di Campiglio (ITA).4th Men's Slalom. Official Results Run1 [Internet]. 2020 [consultado el 22 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://medias2.fis-ski.com/pdf/2020/AL/0087/2020AL0087.pdf>
145. Supej M, Bracic M, Coh M. the Use of a High-End Global Navigation Satellite System in a 100 M Sprint. *Kinesiol Slov*. 2010;16(3):14–22.
146. Yeadon MR, Kato T, Kerwin DG. Measuring running speed using photocells. *J Sports Sci*. 1999;17(3):249–57.
147. Realtrack Systems. SPRO Manual de Usuario [Internet]. 2021[consultado el 3 de abril de 2018]. Disponible en: <https://wimu.es/>
148. Cross M. Force production in alpine skiers: on- and off-snow assessment and relationship with performance. Université Savoie Mont Blanc; 2022.
149. Reid RC, Gilgien M, Morger T, Tjørhom H, Haugen P, Kipp R, et al. Turn characteristics and energy dissipation in slalom. In: Müller E, Lindinger S, Stöggl T, editors. *Science and skiing IV*. Maidenhead, UK: Meyer & Meyer Sport; 2009. p. 419–429.

10. Referencias

150. Morton RA, Leach MP, Paine JG, Cardoza MA. Monitoring Beach Changes Using GPS Surveying Techniques. *J Coast Res.* 1999;9(3):702–20.

11. Anexos

Material suplementario del estudio 2: caracterización de la geomorfología del terreno y de los diferentes trazados.

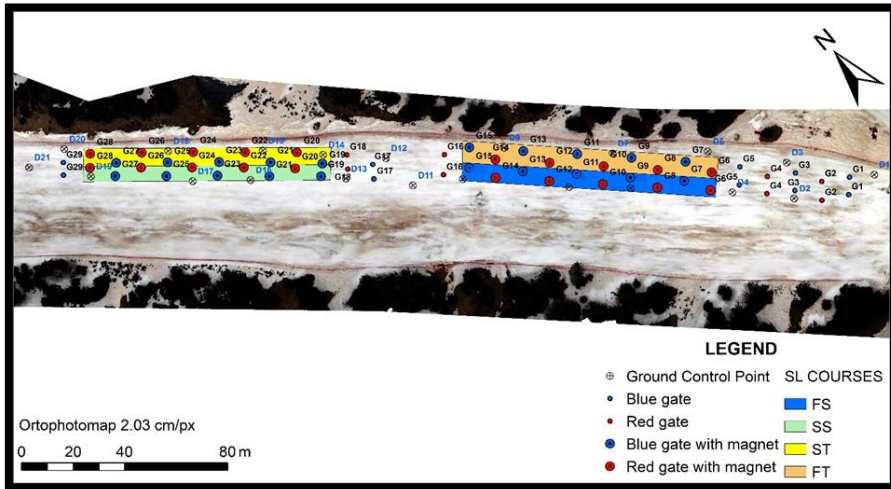


Figura 45. Ortophotomapa generado por el *software* Agisoft®. Cuatro trazados de SL: FT, el trazado girado en la pendiente suave (polígono naranja); ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada (polígono amarillo); FS, el trazado más recto en la pendiente suave (polígono azul), y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada (polígono verde). Las puertas dónde se colocó el imán están resaltadas.

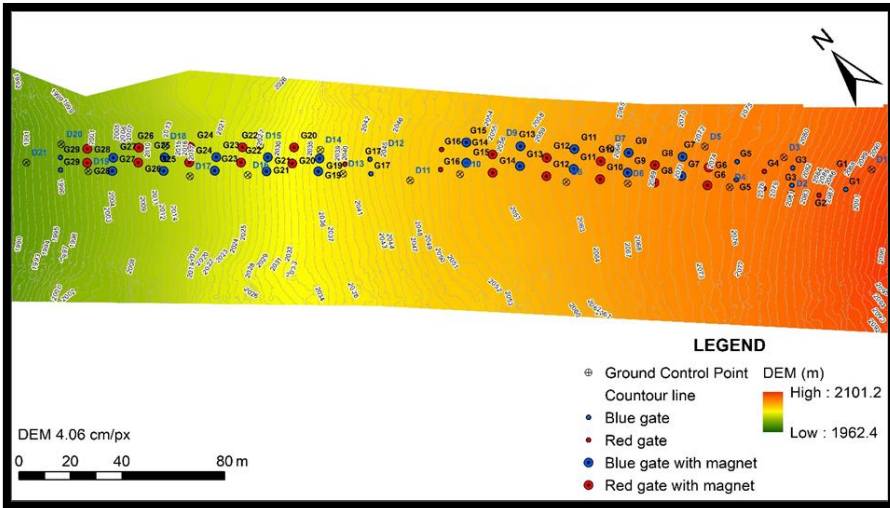


Figura 46. MDE con mapa de curvas de nivel generado por el *software* Agisoft®.

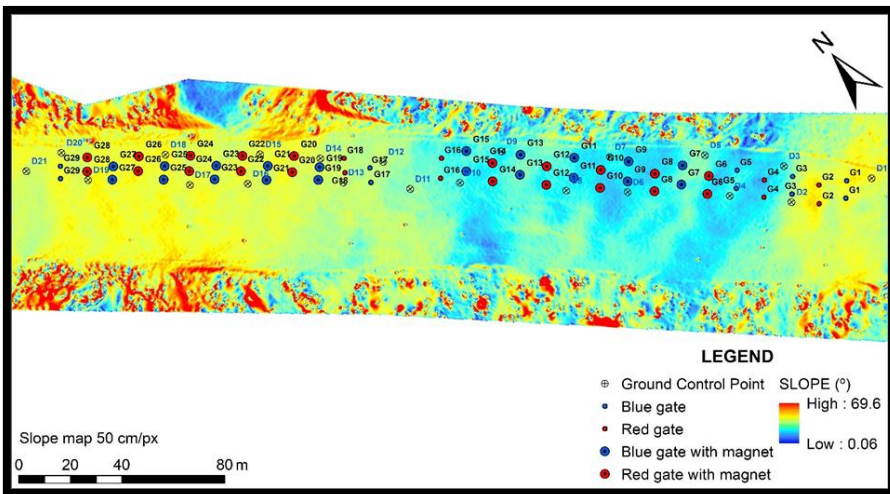


Figura 47. Mapa de pendientes. Para obtener más información sobre cómo el *software* ArcGIS calcula la pendiente, consulte el siguiente enlace:
<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>

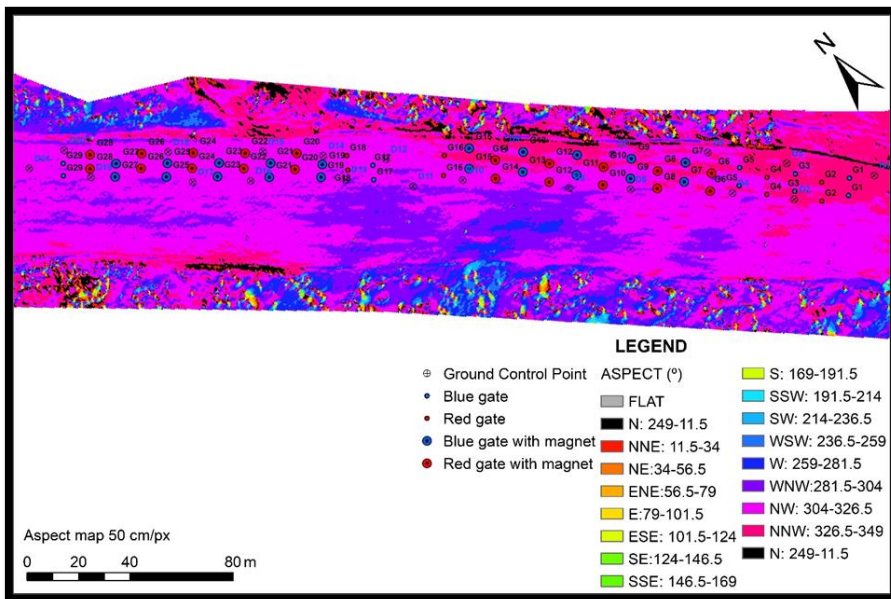


Figura 48. Mapa de orientaciones. Para obtener más información sobre cómo el software ArcGIS calcula la orientación, consulte el siguiente enlace: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>



Figura 49. Captura de la posición de un punto de control mediante un rover GNSS Leica GS18 T RTK.

Tabla 10. Caracterización de los cuatro trazados de SL

	Puerta	Pie exterior	Coordenadas UTM			Pendiente (°)	Orientación (°)	Puntos Cardinales	GD (m)	GO (m)	VGD (m)	VD (m)
			x (m)	y (m)	z (m)							
Trazado	G6	L	389160,54	4713375,24	2073,86	13,22	320,23	NO	11,406	3,220	10,942	1,931
FT	G7	R	389155,40	4713384,93	2070,88	14,89	338,37	NNO	11,368	3,722	10,742	2,974
	G8	L	389145,06	4713389,39	2068,95	10,72	313,73	NO	11,421	4,012	10,694	1,930
	G9	R	389140,32	4713399,59	2066,88	11,99	326,07	NO	11,443	4,051	10,702	2,070
	G10	L	389129,90	4713404,03	2064,94	10,44	330,42	NNO	11,495	4,030	10,765	1,943
	G11	R	389125,09	4713414,24	2062,72	12,57	329,54	NNO	11,499	4,066	10,757	2,214
	G12	L	389114,70	4713418,54	2060,46	13,63	334,30	NNO	11,468	3,969	10,760	2,262
	G13	R	389109,76	4713428,58	2057,66	14,06	326,68	NNO	11,542	3,882	10,870	2,800
	G14	L	389099,40	4713433,10	2055,49	12,84	323,29	NO	11,505	3,941	10,809	2,169
	G15	R	389094,61	4713443,18	2052,94	13,39	329,52	NNO	11,452	3,674	10,846	2,558
Trazado	G19	L	389046,87	4713475,08	2036,40	20,94	307,78	NO	10,750	3,869	10,029	3,388
ST	G20	R	389042,05	4713484,75	2032,42	21,24	315,89	NO	11,515	4,064	10,774	3,978
	G21	L	389031,78	4713488,39	2028,51	22,27	317,24	NO	11,582	3,847	10,925	3,915
	G22	R	389026,73	4713497,69	2024,40	22,11	320,30	NO	11,347	3,850	10,674	4,105
	G23	L	389016,49	4713501,31	2020,66	21,21	313,05	NO	11,489	3,859	10,822	3,741
	G24	R	389011,30	4713510,76	2016,66	19,82	313,78	NO	11,503	3,956	10,801	4,000
	G25	L	389001,07	4713514,11	2012,74	23,21	313,70	NO	11,455	3,879	10,779	3,924
	G26	R	388995,80	4713523,42	2008,50	22,58	315,82	NO	11,500	3,825	10,845	4,235
	G27	L	388985,68	4713526,82	2004,49	21,79	311,64	NO	11,404	3,700	10,787	4,014
	G28	R	388980,18	4713536,00	2000,27	21,47	310,26	NO	11,505	3,464	10,971	4,213

	Puerta	Pie exterior	Coordenadas UTM			Pendiente (°)	Orientación (°)	Puntos Cardinales	GD (m)	GO (m)	VGD (m)	VD (m)
			x (m)	y (m)	z (m)							
Trazado	G6	L	389155,67	4713370,24	2073,85	9,59	322,31	NO	11,667	2,911	11,298	2,201
FS	G7	R	389150,25	4713379,50	2071,39	13,98	325,01	NO	11,012	3,104	10,565	2,463
	G8	L	389140,56	4713384,26	2069,20	11,95	317,82	NO	11,010	3,224	10,528	2,190
	G9	R	389135,07	4713393,93	2067,11	11,07	306,92	NO	11,317	3,206	10,854	2,093
	G10	L	389125,22	4713398,89	2065,19	10,18	319,98	NO	11,188	3,252	10,704	1,915
	G11	R	389119,92	4713408,50	2063,04	11,24	317,45	NO	11,185	3,379	10,662	2,148
	G12	L	389110,01	4713413,17	2060,75	12,49	305,36	NO	11,196	3,344	10,685	2,296
	G13	R	389104,65	4713422,75	2058,25	14,48	326,59	NNO	11,257	3,226	10,785	2,495
	G14	L	389094,87	4713427,62	2055,83	11,62	326,60	NNO	11,189	3,214	10,718	2,424
	G15	R	389089,53	4713437,14	2053,55	13,26	320,46	NO	11,147	3,242	10,665	2,276
Trazado	G19	L	389043,30	4713471,62	2036,25	20,00	306,02	NO	11,491	2,900	11,120	3,861
SS	G20	R	389037,52	4713480,42	2032,44	20,47	316,10	NO	11,194	3,037	10,775	3,810
	G21	L	389027,91	4713484,51	2028,49	20,11	308,03	NO	11,177	3,222	10,703	3,956
	G22	R	389022,48	4713493,50	2024,62	22,16	316,74	NO	11,191	3,282	10,699	3,869
	G23	L	389012,62	4713497,66	2020,66	22,50	307,67	NO	11,411	3,197	10,954	3,954
	G24	R	389007,12	4713506,48	2016,64	20,34	311,45	NO	11,146	3,279	10,652	4,018
	G25	L	388997,34	4713510,34	2012,70	21,94	306,88	NO	11,232	3,310	10,733	3,946
	G26	R	388991,90	4713519,20	2008,58	23,74	318,46	NO	11,179	3,287	10,685	4,122
	G27	L	388982,11	4713523,12	2004,51	21,65	302,21	ONO	11,299	3,223	10,829	4,064
	G28	R	388976,62	4713531,85	2000,38	21,13	314,27	NO	11,117	2,981	10,710	4,129


FT, el trazado girado en la pendiente suave; ST, el trazado girado en la pendiente pronunciada; FS, el trazado más recto en la pendiente suave, y SS, el trazado más recto en la pendiente pronunciada; G, puerta; L, izquierdo; R, derecho; UTM, *Universal Transversal de Mercator*; x, longitud; y, latitud; z, altitud; NO, Noroeste; NNO, Norte-noroeste; ONO, Oeste-noroeste; GD, distancia entre puertas; GO, distancia horizontal entre puertas; VGD, distancia vertical entre puertas; VD, desnivel.



inefc

Institut Nacional
d'Educació Física
de Catalunya

Barcelona

 Generalitat
de Catalunya



UNIVERSITAT DE
BARCELONA