

## Desarrollo de herramientas cuantitativas para asistir en la toma de decisiones médicas relacionadas a discapacidades motrices

*Paola Catalfamo-Formento, Claudia Bonell, Julio Aldonate, Verónica Barrera, Analía Cherniz, Cesar Ignacio Dutto, Eloísa García-Añino, Gabriela Merino, Eugenia Muñoz-Larrosa, Emiliano Ravera, Mauricio Riveras*

**Autores:** Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta provincial 11, km 10 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina

**Contacto:** [pcatalfamo@ingenieria.uner.edu.ar](mailto:pcatalfamo@ingenieria.uner.edu.ar)

**ARK:** <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s22504559/7x8k34kku>

### Resumen

Se define como discapacidad motriz a la disminución total o parcial de la movilidad en uno o más miembros del cuerpo. Las personas realizan tratamientos de rehabilitación motriz para su reinserción activa a la sociedad. Para evaluar el resultado de los tratamientos se requieren de herramientas objetivas, confiables, reproducibles y tecno-lógicamente accesibles para las instituciones de salud de la región. El objetivo de este trabajo fue desarrollar herramientas cuantitativas de la ingeniería que cumplan con estos requisitos.

Para ello se estudiaron herramientas de análisis del movimiento humano, tales como parámetros espacio-temporales, despeje mínimo del pie, índices de gasto energético y método de análisis de presiones plantares. Además, para facilitar la implementación de herramientas en los ámbitos clínicos, se desarrollaron softwares que permiten el cálculo automático de los parámetros. Finalmente, se diseñaron e implementaron protocolos de análisis del movimiento humano en centros regionales dedicados a la rehabilitación motriz.

Los resultados de este proyecto muestran que es posible desarrollar herramientas basadas en la cuantificación de parámetros biomecánicos y fisiológicos, provistas desde los distintos campos de la ingeniería biomédica, que resultan objetivas, confiables, reproducibles y tecnológicamente accesibles para las instituciones de salud de la región.

**Palabras clave:** Análisis del movimiento humano, Análisis de la marcha, Discapacidad, Rehabilitación.

## Objetivos propuestos y cumplidos

La evaluación de los tratamientos de rehabilitación para personas con discapacidad o limitaciones motrices y la efectividad de las herramientas comúnmente utilizadas para realizar esa evaluación son dos aspectos continuamente discutidos. Fundamentalmente, las principales causas de discusión son la subjetividad en la interpretación de las escalas de valoración propuestas (Taylor-Rowan, Wilson, Dawson, & Quinn, 2018), la inexistencia de valores normalizados de referencia para las variables cuantificadas (Aloraini, Gäverth, Yeung, & MacKay-Lyons, 2015; Beauchet et al., 2017) y la falta de consenso en los indicadores o escalas de valoración (Koumpouros, 2016; Rosa, Marques, Demain, Metcalf, & Rodrigues, 2014; Shakti, Mathew, Kumar, & Kataria, 2018; Wang, Markopoulos, Yu, Chen, & Timmermans, 2017).

En este sentido, la ingeniería y las nuevas tecnologías en sensores, electrónica y de la información han provisto de numerosas herramientas para la detección y valoración de la discapacidad y la asistencia a los procesos de rehabilitación (Imam, Miller, McLaren, Chapman, & Finlayson, 2013; Meijer, Graafland, Goslings, & Schijven, 2017; Shull, Jirattigalachote, Hunt, Cutkosky, & Delp, 2014; Wang et al., 2017). Sin embargo, éstos han sido poco explorados y evaluados y raramente utilizados en el ámbito clínico. En este proyecto se planteó como hipótesis que es posible apoyar la toma de decisiones médicas y documentar procesos de rehabilitación mediante herramientas objetivas, confiables, reproducibles y tecnológicamente accesibles para las instituciones de salud de la región. Particularmente, se consideró clave el desarrollo de herramientas basadas en la cuantificación de parámetros biomecánicos y fisiológicos, provistas desde los distintos campos de la ingeniería biomédica en donde se desempeñan los investigadores de este proyecto.

Como objetivo general se propuso desarrollar herramientas cuantitativas de la ingeniería que permitan asistir la toma de decisiones médicas en la discapacidad motriz.

Durante el desarrollo del proyecto, se desarrollaron herramientas cinemáticas, fisiológicas y de análisis de presiones plantares que permitieron cumplir con el objetivo general.

## Marco teórico y metodológico

Se define como discapacidad motriz a la disminución total o parcial de la movilidad en uno o más miembros del cuerpo. Esta discapacidad se caracteriza por la dificultad de la persona afectada en realizar actividades motoras, siendo el tipo y grado de afectación dependiente del origen de la misma. Las discapacidades motrices pueden ser congénitas o adquiridas, a consecuencia, por ejemplo, de enfermedades neurológicas de la infancia (como la parálisis cerebral) o bien consecuencia de accidentes cerebro vasculares o traumatismos. Este tipo de discapacidad es demandante de prestaciones de rehabilitación, es decir, de la aplicación de protocolos y herramientas específicas destinadas a lograr la recuperación de todas o la mayor parte posible de las capacidades motoras alteradas, que suelen estar acompañadas de discapacidades sensoriales, mentales y/o viscerales. Estos protocolos y técnicas son instrumentadas y proporcionadas por diversas especialidades del área de salud, y tienen como fin último la restauración y/o adquisición de habilidades que le permitan alcanzar al paciente afectado, el nivel psicofísico y social más adecuado para lograr la integración social.

Cada una de las dimensiones evaluadas para diagnosticar, monitorear y valorar la rehabilitación de la discapacidad motriz y la evolución del paciente en el tiempo, requiere de la aplicación de *herramientas*, las cuales se apoyan en mediciones y/o evaluaciones objetivas o subjetivas del paciente y su entorno (Ainsworth, Cahalin, Buman, & Ross, 2015; Koumpouros, 2016; Pietrzak & Jozwiak, 2001; Ryan, Cassidy, Noorduy, & O'Connell, 2017; Yamaguchi et al., 2018). Éstas tienen como objetivo valorar el impacto de los procesos de rehabilitación, las posibles complicaciones, y la definición de los tratamientos médicos a seguir. Mayoritariamente, las herramientas que se utilizan en la clínica son subjetivas y se sustentan en pruebas o tests cuyos resultados se basan en la observación del profesional de salud o de lo que el propio paciente informa durante la entrevista u observa en su vida diaria (Alotaibi, Long, Kennedy, & Bavishi, 2014; Ashford, Brown, & Turner-Stokes, 2014; Graham, Harvey, Rodda, Natrass, & Pirpiris, 2004; Ryan et al., 2017; Santisteban et al., 2016).

Las dimensiones comúnmente evaluadas son la actividad del paciente, su participación en situaciones de la vida cotidiana y su calidad de vida. Para ello, se realizan valoraciones de la habilidad del paciente para ejecutar determinadas tareas estandarizadas en un ambiente controlado o en el medio en que se desenvuelve cotidianamente y del impacto de la discapacidad en su desempeño físico, psicológico y social. En parálisis cerebral, por ejemplo, es común utilizar las escalas conocidas como GMFM-88 y GMFM-66 (Gross Motor Function Measure) (Alotaibi et al., 2014) o FMS (Functional Mobility Scale) (Graham et al., 2004). Las discapacidades motrices ocasionadas por accidentes cerebrovasculares, suelen evaluarse mediante tests como el Índice de Movilidad Rivermead, el cuestionario referido al uso de escaleras y la Escala Funcional de Miembro Inferior (Ashford et al., 2014). La aplicación de una u otra herramienta de valoración queda sujeta a la decisión médica, lo que ha derivado en la necesidad de establecer consensos en la forma de medición y la búsqueda de herramientas de medición complementarias, tanto en el ámbito clínico como científico (Ammann-Reiffer, Bastiaenen, de Bie, & van Hedel, 2014; Ashford et al., 2014; Broderick, Adeoye, & Elm, 2017). Sin embargo, la desventaja principal que presentan los métodos más utilizados es su subjetividad, principalmente en la determinación de las categorías o niveles en los que se deben evaluar cada uno de los ítems, por lo que dependen fuertemente de la experiencia del observador y de la visión del propio paciente de su realidad (Broderick et al., 2017; Himuro, Abe, Nishibu, Seino, & Mori, 2017; Koumpouros, 2016; Muro-de-la-Herran, García-Zapirain, & Méndez-Zorrilla, 2014; Santisteban et al., 2016; Taylor-Rowan et al., 2018).

Los métodos subjetivos de evaluación pueden complementarse mediante la obtención de parámetros biomecánicos y fisiológicos. Para el análisis de la afectación de la marcha pueden utilizarse, por ejemplo: herramientas cinemáticas, como los parámetros espacio temporales (velocidad, cadencia, longitud de paso), los ángulos de las articulaciones, momentos articulares; herramientas fisiológicas como el consumo de oxígeno, y actividad electromiográfica, entre otros (Sagawa et al., 2011). Estos parámetros deben consensuarse y evaluarse en cuanto a su confiabilidad y repetibilidad, a los fines de que puedan ser utilizados en forma sistemática para valorar las funciones motoras tanto en el diagnóstico como en la efectividad de los tratamientos (Ammann-Reiffer et al., 2014; Cole et al., 2014). Ejemplo de estas tecnologías abundan en las publicaciones científicas de los últimos años. La espasticidad, por ejemplo, definida como el aumento del tono muscular en respuesta al estiramiento pasivo, aparece como consecuencia

de lesiones en las redes que intervienen en el control motor por desórdenes neurológicos, accidentes cerebrovasculares, lesiones medulares, esclerosis múltiple y parálisis cerebral. Tradicionalmente ésta ha sido valorada mediante la escala Ashworth (Mutlu, Livanelioglu, & Gunel, 2008), sin embargo, se ha propuesto medir sus efectos mediante dinamómetros (Yamaguchi et al., 2018). El análisis de la marcha también se ha realizado mediante técnicas instrumentadas. La combinación de estrategias de captura del movimiento, basado en cámaras videográficas y el seguimiento de puntos de interés identificados con marcadores reflectivos, junto al uso de plataformas de fuerza y el registro de la electromiografía en simultáneo, ha permitido evaluar características de la marcha que no pueden ser fácilmente visualizadas mediante los test clínicos (Buckley, Mazzà, & McNeill, 2018; Comber, Galvin, & Coote, 2017; Vienne, Barrois, Buffat, Ricard, & Vidal, 2017). Las mismas técnicas instrumentadas han sido utilizadas para la valoración en el miembro superior (Jaspers et al., 2009, 2011). Algunas de estas herramientas han sido exploradas por este grupo de investigación en proyectos anteriores (Cardona et al., 2014; Catalfamo-Formento, Acevedo, Ghousayni, & Ewins, 2014; Muñoz, Catalfamo Formento, & Bonell, 2019; P Ravera et al., 2012; Profumieri, Bonell, Catalfamo, & Cherniz, 2016; Schulz, Paola, Emiliano, & Bonell, 2016).

El progreso de las nuevas tecnologías, tanto en el área de los sensores como de las tecnologías de la información, ha brindado la posibilidad de contar con herramientas de adquisición de datos a costo accesible, prácticas y fácilmente trasladables al ámbito clínico. En el contexto del análisis de la marcha, éstas son útiles para cuantificar en forma objetiva diferentes parámetros y construir nuevos índices o indicadores a partir de ellos (McGibbon et al., 2018), disminuyendo así algunas de las desventajas introducidas por la utilización de las técnicas de valoración subjetivas (Muro-de-la-Herran et al., 2014). Sin embargo, frente a la disponibilidad y accesibilidad de herramientas de medición, se contrapone la heterogeneidad de los instrumentos utilizados, lo que dificulta la evaluación correcta del impacto de los procesos de rehabilitación y la comparación de los resultados obtenidos. Frente a esto, ha surgido la necesidad de enfocar las investigaciones actuales al desarrollo de herramientas de calidad, verificadas y validadas en el ámbito clínico. Además, estas herramientas deben ser factibles de aplicarse en la clínica, por lo que su desarrollo debe considerar aspectos como la portabilidad, el costo, la usabilidad y el tiempo que demande su aplicación (Ammann-Reiffer et al., 2014; Buckley et al., 2018; Hawkins, Henry, Crandell, & Nguyen, 2014).

Metodológicamente, las tareas de investigación propuestas en este proyecto se realizaron mayormente en los laboratorios de la FIUNER y en el IBB, dado que los investigadores participantes pertenecen a estas instituciones. Se continuó, además, con los trabajos iniciados con el Hospital Vera Candioti en el marco del Convenio Especifico de Cooperación entre instituciones y con otras instituciones de salud, locales y nacionales.

La selección de las herramientas a estudiar se basó, en gran parte en la experiencia de los profesionales de la salud que actuaron como integrantes externos de este proyecto y complementariamente con el análisis de las metodologías y/o herramientas utilizadas y referenciadas por la bibliografía, que hayan sido propuestas para la valoración de los diferentes aspectos de la discapacidad motriz, sean éstas subjetivas (test de evaluación o autoevaluación de pacientes) o bien objetivas.

Con la información obtenida se seleccionaron las variables que mejor puedan representar los aspectos del movimiento que son distintivos de los cambios que desean valorarse y que, incorporados a protocolos, permitan cuantificar en forma confiable,

sencilla y práctica, los aspectos de interés. Estas variables (velocidad, tiempo, actividad eléctrica muscular, etc.) deberán ser capaces de informar sobre los parámetros biomecánicos y fisiológicos que han demostrado ser fuentes de información para el diagnóstico y cuantificación de la evolución de estos pacientes (velocidad de marcha, tiempo de paso, co-contracción muscular, gasto energético, entre otros).

La verificación y/o validación de las herramientas y protocolos diseñados fue realizada primero en sujetos sanos y luego, en sujetos con discapacidades motrices en el ámbito de instituciones de salud. Los datos utilizados para la valoración de estas herramientas y/o protocolos fueron registrados por los investigadores de este proyecto en las instituciones de salud involucradas, así como también extraídos de bases de datos registrados previamente, adquiridos por miembros de este proyecto en el Laboratorio de Análisis del Movimiento Humano de la Universidad de Surrey.

La implementación de protocolos que incluyen las herramientas propuestas se realizó en instituciones de salud de la región.

En particular el estudio de las herramientas se enfocó en:

- Desarrollo y validación de herramientas cinemáticas (en particular, parámetros espacio temporales y despeje mínimo del pie)
- Desarrollo y validación de herramientas que utilicen presiones plantares
- Desarrollo y validación de herramientas fisiológicas
- Diseño, implementación y valoración de protocolos de análisis del movimiento humano en ámbitos clínicos

De las herramientas de interés, este grupo de investigación ha diseñado y/o validado técnicas para la estimación de parámetros espacio temporales a partir del análisis de señales videográficas convencionales (Arcila Cano, Ewins, Shaheen, & Catalfamo Formento, 2017; De Grucci, Dutto, Barrera, Bernal, & Catalfamo Formento, 2017; De Grucci, Ewins, Shaheen, & Catalfamo Formento, 2016; Peterson, Ewins, Shaheen, & Catalfamo Formento, 2015), de presiones plantares (Cherniz, Zapata, Zegalo, & Catalfamo Formento, 2017; Völker, Shaheen, Ewins, Acevedo, & Catalfamo Formento, 2014), y de la valoración funcional a partir de escalas de movimiento (Muñoz Larrosa, Dutto, Barrera, Bernal, & Catalfamo Formento, 2017).

Dado que las validaciones ya realizadas se han practicado en participantes sanos, es de interés ahora continuar la validación de las herramientas, ya desarrolladas y las que surjan de este proyecto, en poblaciones de pacientes con discapacidades motrices. Para esto se realizará un análisis de las herramientas propuestas y un análisis de protocolos de aplicación clínica.

## **Síntesis de resultados y conclusiones**

El trabajo realizado durante este proyecto muestra que el proceso de diseño e implementación de herramientas de análisis del movimiento humano en el ámbito clínico es complejo, multifactorial e indefectiblemente multidisciplinario.

Las herramientas deben estar validadas para la aplicación específica para las que se la espera destinar pero también deben ser prácticas para su uso en el ámbito clínico. Y esta practicidad no solamente incluye el costo bajo del equipamiento, como tantas

veces se menciona en los proyectos para países en desarrollo (Agyenkwa et al., 2020; Ntsiea, Mudzi, Maleka, Comley-White, & Pilusa, 2022). La practicidad incluye que las herramientas sean fáciles de utilizar e implementar en el ámbito clínico, así como fáciles de interpretar y analizar. En ese sentido, en el proceso de validación de las herramientas que se realizó en el proyecto, fue evidente que se requieren softwares que permitan realizar los cálculos de los diferentes parámetros de manera automática.

Y una vez que la herramienta está validada y su diseño maximiza la practicidad, se pueden implementar en formato de protocolo (serie de evaluaciones) en los ámbitos clínicos.

A continuación, se describe un resumen de los resultados encontrados para cada eje temático.

### **Desarrollo y validación de herramientas cinemáticas**

En el ámbito del Análisis del Movimiento Humano, las herramientas cinemáticas son aquellas que pueden describir al movimiento, sin tener en cuenta las fuerzas que lo generan.

En particular, en este proyecto se estudiaron dos herramientas cinemáticas: los parámetros espacio temporales (PET) y el despeje mínimo del pie (MTC por sus siglas del inglés Minimum Toe Clearance).

Los parámetros espacio temporales son un grupo de variables que miden variables temporales y espaciales del caminar (o marcha) de las personas e incluyen, entre otros, la velocidad de caminata, el tiempo de apoyo de cada pie, el tiempo de balanceo y el número de pasos por minuto (cadencia).

Directamente relacionados con los parámetros, se puede mencionar el índice de simetría, el cual relaciona los parámetros entre las extremidades inferiores y estima un porcentaje de "similaridad". Por ejemplo, comparando el tiempo de apoyo de una extremidad respecto a la otra, un valor de 100% de simetría indicaría que ambas extremidades son simétricas, y sus valores son exactamente iguales.

En el marco de este proyecto primero se estudiaron los siguientes aspectos de los parámetros espacio temporales (PET) y sus índices de simetría (IS):

1. Se investigó el uso de un método basado en videografía convencional para el cálculo de PET tanto en el laboratorio de marcha como en el ámbito hospitalario.
2. Se los investigó como herramientas para distinguir entre grupos de pacientes con amputación de miembro inferior, que se encontraban en distintos estadios de su rehabilitación.
3. Se los estudió como herramientas para distinguir el efecto de diferentes prótesis sobre pacientes amputados de miembro inferior.
4. Como resultado de estas investigaciones se decidió desarrollar un software que permita el cálculo de los parámetros de manera simple.
5. Se realizó la documentación del software, de tal forma de cumplir con las buenas prácticas en Ingeniería del Software.

En el primer caso, se calcularon los PET en un grupo de personas sanas, con el objetivo de comparar el uso del método en un entorno clínico con su uso en un laboratorio de marcha. Para ello, se detectaron dos eventos de marcha (contacto inicial y despeje del pie) y se calcularon seis PET y para tres de ellos, se calculó el IS. Los resultados

para el cálculo de PET en el entorno clínico fueron comparables a los obtenidos en el laboratorio de marcha. Además, los valores de PET y simetría estuvieron dentro del rango de los reportados por otros autores. Estos resultados sugieren que el método de detección de eventos visuales podría considerarse como una opción para el análisis básico del movimiento humano en el entorno clínico. Este estudio fue publicado en (De Grucci et al., 2019).

En el segundo caso, el objetivo del estudio fue evaluar los parámetros temporales y la simetría asociada a ellos como indicadores del estadio de rehabilitación de personas con amputación de miembro inferior. Hasta aquí se han estudiado los parámetros espacio temporales en dos pacientes. Uno de ellos se encontraba en su etapa final del tratamiento (etapa protésica) y otro ya había concluido su tratamiento y regresaba a la institución para control. Este estudio se realizó en el marco del Convenio Específico de Investigación que posee la FIUNER con el Hospital de Rehabilitación Integral del Discapacitado Dr. Vera Candiotti. En ambos pacientes se evaluaron parámetros tales como velocidad de marcha, cadencia, tiempo de ciclo, entre otros. Los resultados mostraron que el paciente recuperado mostró resultados comparables a los resultados publicados en la literatura para pacientes ya rehabilitados (y en algunos casos, mejores resultados) y más cercanos a los de personas sanas que los que mostró el paciente en recuperación. Este estudio fue publicado en (Bertot, Barrera, Dutto, Bernal, & Catalfamo Formento, 2019a).

Además, se estudió la implementación de los PET junto con un test subjetivo y los resultados mostraron que ambas herramientas son simples de aplicar, y relativamente rápidas. Este estudio fue publicado en (Bertot, Barrera, Dutto, Bernal, & Catalfamo Formento, 2019b)

En el tercer caso, el objetivo del estudio fue evaluar los parámetros espacio temporales y la simetría asociada a ellos como indicadores de los efectos de distintas tecnologías protésicas en el caminar de pacientes amputados.

Para ello, se realizaron dos estudios en diferentes suelos.

Por un lado, se evaluó la marcha de 12 pacientes amputados transtibiales unilaterales caminando sobre suelo a nivel y utilizando dos tecnologías protésicas, conocidas como ESAR y Prótesis adaptativa hidráulica (Figura 1).

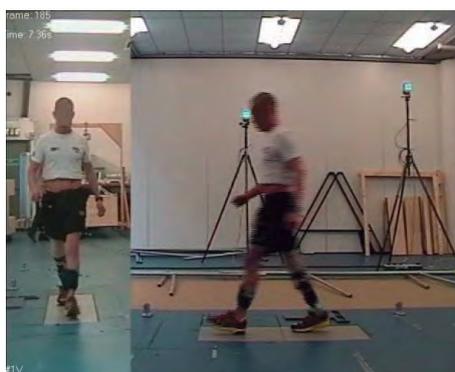


Figura 1. Medición de la marcha de personas amputadas de miembro inferior.

Se midieron los parámetros espacio-temporales tanto en la pierna sana como en la pierna protésica y se calculó el índice de simetría. Los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas para las diferentes prótesis, sugiriendo que los

parámetros y sus índices de simetría no reflejan las diferencias ocasionadas en la marcha sobre suelo a nivel por distintas prótesis. Este estudio fue publicado en (Mauricio Riveras, Ravera, Shaheen, Ewins, & Catalfamo Formento, 2019).

También con este último objetivo, se evaluó la marcha de 13 pacientes amputados transtibiales caminando sobre una rampa (Figura 2) y utilizando, en este caso, tres tecnologías protésicas: las mencionadas anteriormente y una Prótesis adaptativa hidráulica microcontrolada.

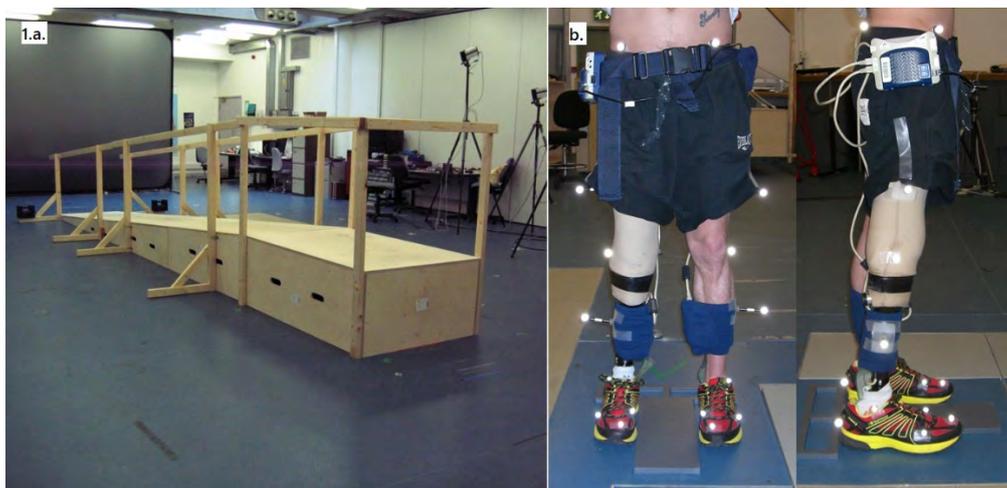


Figura 2. Rampa utilizada en las mediciones y set up de marcadores usados.

También en este caso, los parámetros fueron medidos tanto en la pierna sana como en la pierna protésica y la relación entre ellos fue cuantificada usando el índice de simetría.

Los resultados mostraron que la prótesis microcontrolada disminuye la velocidad de descenso sobre la rampa de manera significativa, lo cual es un efecto beneficioso y esperado de este tipo de prótesis. Sin embargo, este fue el único parámetro que mostró diferencia significativa, cuando se compararon las prótesis. Por lo que concluimos que los parámetros espacio-temporales y sus índices de simetría no reflejan las diferencias en el patrón de marcha ocasionadas por las diferentes prótesis sobre rampas. Este estudio fue publicado en (M. Riveras, Ravera, Shaheen, Ewins, & Catalfamo Formento, 2019).

Los resultados de estas investigaciones, en particular las realizadas en el Hospital de Rehabilitación Dr. Vera Candiotti indicaron que, para la implementación de la medición de PET en los ámbitos clínicos, era necesario contar con un software de análisis de videos y cálculo automático de parámetros.

Fue así como se gestionó el desarrollo de un software que cumpliera con estos objetivos. Para ello, se trabajó con las herramientas de la Ingeniería de Software con el fin de realizar el diseño funcional de un producto de software que realice el cálculo de dichos parámetros. Se obtuvieron los requerimientos de los usuarios y se analizaron, luego se modelizaron los casos de uso. En base a estos, se desarrolló la experiencia de usuario (maquetización). Siguiendo con el análisis de calidad del producto de software, se realizaron los casos de prueba funcionales, con los que se podía probar el programa una vez que se encuentre implementado. Esta experiencia fue publicada en (Primosich, Molar-Battisti, Catalfamo-Formento, Valotto, & Bonell, 2022).

Luego, se realizó el proceso de elaboración y análisis de dos documentos que faciliten la aplicación del software en el ámbito de la investigación en contextos clínicos. Los documentos consisten en un Protocolo de registro videográfico y un Manual de usuario del software. El primero es un protocolo que guía el proceso de registro de videos de tal forma de maximizar su uso para la evaluación de parámetros. Para realizarlos, se efectuaron registros de prueba en diferentes condiciones de registro, efectuando una rúbrica de aceptación y rechazo de la calidad de los registros. El segundo es un Manual específico de uso del software desarrollado y se confeccionó mediante el seguimiento exhaustivo de los pasos y a través de pruebas de uso. Los resultados de las pruebas mostraron que los registros podrían ser realizados mediante cámara de celulares de alta calidad. Esto representa un avance en relación al uso de cámaras de fotografía, dado que en principio no sería necesario adquirir un equipo para esta aplicación. Esta experiencia fue publicada en (Frisoli, Poux, Deris, Catalfamo-Formento, & Añino, 2022).

Por otro lado, en relación al despeje mínimo del pie, o MTC, el mismo puede definirse como la distancia mínima que existe entre el pie y el suelo durante la fase de balanceo. En esta línea se avanzó en:

1. La validación del MTC como herramientas para distinguir el efecto de diferentes prótesis sobre pacientes amputados de miembro inferior.
2. El diseño y desarrollo de un software para el cálculo de MTC a partir de datos cinemáticos.

En cuanto a la validación del MTC, se evaluó la marcha de 14 pacientes amputados transtibiales caminando sobre una rampa y utilizando las tres tecnologías protésicas antes mencionadas: ESAR, Prótesis adaptativa hidráulica y Prótesis con articulación hidráulica microcontrolada. En todos los casos se evaluó el valor de MTC promedio para cada pie, cuando se utilizaban las diferentes prótesis. Y también se evaluó la probabilidad de tropiezo, como una relación del MTC.

Los resultados mostraron que utilizando una prótesis microcontrolada los valores de MTC eran significativamente mayores en ascenso ( $P \leq 0.001$ ,  $W = 0.58$ ) y descenso ( $P = 0.003$ ,  $W = 0.47$ ) de la rampa para la pierna protésica. Además, el Coeficiente de Variación para las prótesis hidráulicas fue significativamente menor ( $P = 0.014$ ,  $W = 0.45$ ) cuando se compara a la prótesis hidráulica. Valores más altos y menos variables de MTC se suponen más seguros para la caminata.

En este sentido y directamente relacionado a la seguridad, la prótesis hidráulica microcontrolada mostró la menor probabilidad de tropiezo.

De esto, se concluyó que las prótesis hidráulicas y en particular la prótesis hidráulica microcontrolada ayudan a reducir el riesgo de tropiezo, aumentando el valor medio del MTC, disminuyendo la variabilidad y reduciendo la probabilidad de tropiezo cuando se camina sobre rampas.

Este estudio fue publicado en (Mauricio Riveras, Ravera, Ewins, Shaheen, & Catalfamo-Formento, 2020).

En relación a este mismo parámetro MTC se trabajó también en el diseño y desarrollo de un software que permite el cálculo de los valores de MTC, a partir de archivos que contengan datos cinemáticos (en particular deben contener la trayectoria del marcador de la punta del pie). Este trabajo se llevó a cabo en el marco de una tesis de

grado de los alumnos Melisa y Jonathan Haller, dirigida por los investigadores Mauricio Riveras y Gabriela Merino. Al momento de elaboración del presente informe (octubre 2022), el software se encuentra subido a la web y accesible en:

<https://jonathan-haller.shinyapps.io/MTCLab/>

### Desarrollo y validación de herramientas que utilicen presiones plantares

En esta línea se investigó el uso de datos de presiones plantares para discriminar entre cinco modos de locomoción.

Para ello, se utilizaron datos de presiones plantares de seis personas sin patologías motrices, caminado sobre suelo a nivel, rampa ascendente, rampa descendente, escaleras de forma ascendente y descendente. Los datos se recolectaron utilizando plantillas FScan™ (Tekscan Inc., MA) a 200 Hz.

En un tratamiento off line, se construyeron tres áreas virtuales sobre cada plantilla, el talón, primer cabeza metatarsiana y quinta cabeza metatarsiana (Figura 3). Estas áreas fueron seleccionadas de tamaño igual a los habitualmente utilizados sensores de presión tipo foot-switches.

Se utilizó un clasificador LDA (del inglés Linear Discriminant Analysis) para clasificar los modos de locomoción y distinguir entre los cinco modos presentes (caminata sobre suelo a nivel, rampa ascendente y descendente, escaleras ascendente y descendente).

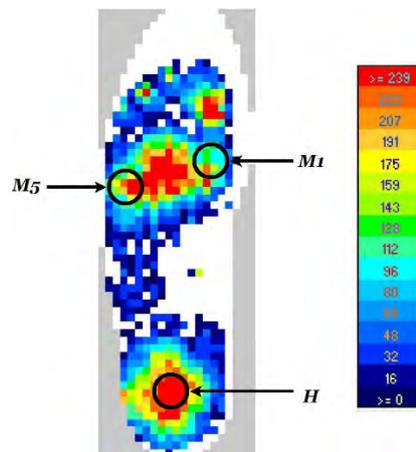


Figura 3. Áreas virtuales construidas sobre los datos de presiones plantares. H= heel (área del talón), M1 y M5 áreas de primera y quinta cabeza metatarsiana.

Los resultados mostraron que el clasificador produjo un error promedio de  $7.85 \pm 4.76\%$ . Estos resultados fueron muy similares a los publicados en otros estudios que utilizaron mayor número de sensores y estrategias de instrumentación. Estos resultados son prometedores considerando el reducido número de sensores que podría utilizarse para la clasificación, simplificando los sistemas de reconocimiento.

Este trabajo fue publicado en (Lara Barrios, Catalfamo Formento, Muñoz Larrosa, & Blanco Ortega, 2020).

### Desarrollo y validación de herramientas de medición y estimación de variables fisiológicas

La medición del consumo energético ha sido propuesta para la evaluación de pacientes con limitaciones motrices. Habitualmente, el consumo energético se estima

a partir del consumo de oxígeno. Sin embargo, el equipamiento que se necesita para medir este último es poco práctico para ambientes clínicos, dado que es necesario usar una máscara que obstaculiza la respiración normal. Como alternativas, se han propuesto índices basados en la medición de frecuencia cardíaca y aunque la misma posee conocidas limitaciones en la estimación del consumo energético, sirve como una cuantificación del mismo en determinadas condiciones (por ejemplo, cuando el ejercicio propuesto se mantiene dentro de esfuerzos submáximos). Como las mediciones que este PID plantea en general se enfocan en el caminar de los pacientes, se consideró que se cumplían las condiciones necesarias.

A partir del uso de frecuencia cardíaca como indicador del gasto energético, se han propuesto diferentes mediciones para su estimación. Por un lado, se propuso el índice de costo fisiológico (PCI, por sus siglas en inglés) que mide la frecuencia cardíaca antes y después del ejercicio y la velocidad de marcha (Brunelli et al., 2019; Delussu et al., 2014; Fredrickson, Ruff, & Daly, 2007; Vllasolli et al., 2015). También se ha propuesto el índice de frecuencia cardíaca total (THBI por sus siglas en inglés) (Coutinho, Neto, & Beraldo, 2014; Hood, Granat, Maxwell, & Hasler, 2002; Kim, Burns, Ditunno, & Marino, 2007) que mide la cantidad de latidos por minuto durante el ejercicio y la cantidad de latidos durante el reposo.

Como parte de este proyecto se propusieron dos objetivos. Por una parte, se propuso medir la repetibilidad del índice de costo fisiológico (PCI) y del índice de frecuencia cardíaca total (THBI) y compararlas. Para ello se tomaron datos de diez sujetos adultos sin lesiones que afectarían su marcha en dos oportunidades, durante la misma semana. La frecuencia cardíaca fue medida mientras caminaban en un circuito con forma de ocho, en condiciones estacionarias.

Los resultados obtenidos mostraron que el índice THBI, que se calcula dividiendo el número total de latidos durante la marcha por la velocidad media del individuo durante la caminata, presentó buena repetibilidad (ICC=0,84) comparado con el índice PCI (ICC=0,45). Se concluyó entonces que el THBI es un parámetro simple de calcular a partir de los datos de frecuencia cardíaca y provee una alternativa que muestra mayor repetibilidad que el PCI. Este estudio fue publicado en (Muñoz et al., 2019).

Con los resultados de este trabajo se procedió entonces a la postulación del siguiente objetivo que fue evaluar la viabilidad de aplicación del THBI tanto en personas jóvenes como en adultos mayores. Para esto, se estimó el THBI en diez personas jóvenes y en tres adultos mayores, luego de una caminata sobre una figura en forma de 8. La medición se repitió a los siete días después de la primera medición. Los resultados mostraron una buena repetitividad para ambos grupos. La implementación del método mostró ser simple de utilizar, de relativo bajo costo y repetible para ambos grupos de participantes.

Este estudio fue publicado en (Muñoz, Catalfamo Formento, Dutto, Dure, & Bonell, 2020).

### **Desarrollo, implementación y valoración de protocolos de análisis del movimiento humano en ámbitos clínicos.**

Se entiende como protocolo a un conjunto de herramientas, técnicas e instrumentos que se aplican en forma sistemática, y que hacen posible unificar la valoración de los pacientes y ver su evolución en el tiempo. Desde el presente proyecto, se busca incluir en la práctica clínica, protocolos que valoren el estado funcional motriz del paciente. Esta valoración puede hacerse mediante el examen por parte del profesional de la sa-

lud, o bien es realizado mediante escalas o tests que evalúan el impacto de la lesión en las actividades del paciente, pero también pueden incluirse herramientas de análisis del movimiento humano para complementar la información ya obtenida.

Como parte del presente proyecto, se diseñaron e implementaron protocolos dos protocolos para la valoración en pacientes con limitaciones motrices.

Por un lado, se diseñó un protocolo para la evaluación del estado funcional motriz de pacientes con amputación transtibial unilateral. Este trabajo se realizó como parte de un convenio específico de colaboración entre el Hospital de Rehabilitación Dr. Vera Candiotti y la Facultad de Ingeniería de UNER. Inicialmente se propusieron tres herramientas de análisis: PET por videografía convencional, el test AMPPRO de movilidad y la medición de PCI. El sistema de PET por videografía convencional fue desarrollada y validada en investigaciones previas de este mismo grupo de investigación (Arcila Cano et al., 2017; De Grucci et al., 2016; Peterson et al., 2015). Luego de resultados parciales, se eligieron dos de las herramientas (PET por videografía convencional y el test AMPPRO) como parte del protocolo final sugerido.

Por otro lado, se diseñó e implementó un protocolo destinado a la valoración del estado funcional de la rodilla en una institución de la región, el cual integró una escala de medición internacional y PET por videografía convencional.

Este protocolo fue diseñado para el Centro Médico y de Rehabilitación (CMR) de la ciudad de Nogoyá, que solo lleva dos años de trabajo y no aplica ninguna de estas herramientas y tecnologías para el diagnóstico y /o valoración de la rehabilitación de los pacientes que concurren a la institución. El trabajo se realizó en el marco del convenio entre la Facultad de Ingeniería y el CMR.

Dicho protocolo cuenta con dos partes: el cálculo de Parámetros espacio-temporales (PET) y un análisis subjetivo que utiliza el formulario International Knee Documentation Committee (IKDC). Luego de su diseño e implementación se evaluó su aplicabilidad y utilidad mediante un cuestionario para que los especialistas de la institución lo valoren, brindando su opinión y mejoras posibles en el mismo. Se evaluaron 6 pacientes en dos instancias con una diferencia de un mes entre ambas.

Los resultados de las aplicaciones del mismo fueron estudiados de manera individual y global, y se encontraron entre los valores establecidos en la bibliografía.

Se pudo observar que el método videográfico complementa al método subjetivo, brindando información útil para el equipo de trabajo (médicos y kinesiólogos), y para la historia clínica del paciente.

La experiencia en sí misma y los resultados encontrados fueron publicados en (Duré, Catalfamo Formento, & Bonell, 2019a, 2019b; Duré et al., 2020).

## Conclusión

En este proyecto se han validado diferentes herramientas de análisis del movimiento humano, tales como parámetros espacio-temporales, despeje mínimo del pie, índice para estimar el gasto energético y método de análisis de datos de presiones plantares en personas sanas y/o en personas con limitaciones motrices.

Para facilitar la implementación de las herramientas en los ámbitos clínicos, se desarrollaron softwares que permiten el cálculo automático de los PET y del MTC.

Finalmente, se diseñaron e implementaron protocolos de análisis del movimiento humano en centros regionales dedicados a la rehabilitación motriz.

Los resultados de este proyecto muestran que es posible desarrollar herramientas basadas en la cuantificación de parámetros biomecánicos y fisiológicos, provistas desde los distintos campos de la ingeniería biomédica, que resultan objetivas, confiables, reproducibles y tecnológicamente accesibles para las instituciones de salud de la región.

### Indicadores de producción

Pueden describirse fundamentalmente tres indicadores de producción.

El primer indicador es la transferencia de los conocimientos a la comunidad científica en su conjunto. Como medida de ese impacto, consideramos que son prueba cabal de la misma, los artículos publicados durante el desarrollo del proyecto (Bertot et al., 2019a, 2019b; De Grucci et al., 2019; Duré et al., 2019b, 2019a, 2020; Frisoli et al., 2022; Lara Barrios et al., 2020; Muñoz et al., 2019, 2020; Primosich et al., 2022; M. Riveras et al., 2019; Mauricio Riveras et al., 2019, 2020). Los mismos representan no solamente lo que se ha logrado producir como parte del presente Proyecto, sino fundamentalmente lo que se ha logrado transmitir a la comunidad científica, en la forma de disertaciones y presentaciones en conferencias internacionales y publicaciones en revistas con referato. En este sentido, los investigadores también han sido invitados como disertantes invitados a diferentes eventos regionales. La directora del presente proyecto fue disertante invitada a las 9° Jornadas Interdisciplinarias de actualización sobre tecnologías en equipamiento y rehabilitación, que se realizaron conjuntamente con la Expo-ortopédica 2019, organizada por ISPO Argentina, y realizada en Buenos Aires, Argentina. También fue invitada como disertante al III Simposio Internacional LIBiAM - Fisiología aplicada de la clínica al deporte, organizado por el Laboratorio de Investigación en Biomecánica y Análisis de Movimiento (LIBiAM) de la Universidad de la República, en Paysandú, Uruguay. El mismo se realizó de manera virtual los días 4 y 5 de noviembre 2021.

La Bioing. Eugenia Muñoz Larrosa, participó como oradora invitada en las Jornadas de Informática en Salud 2020 (JIS 2020), organizadas por el Departamento de Informática en Salud del Hospital Italiano de Buenos Aires, con una exposición titulada "*Estudio de indicadores de eficiencia de la marcha sensible al tipo de prótesis de miembro inferior, a través del análisis y procesamiento de señales de presión plantar*". Las jornadas se desarrollaron los días 2-4 de noviembre de 2020 de forma virtual.

La Dra. Eloísa García Añino, participó como oradora invitada en las Jornadas de Informática en Salud 2021 organizadas por el Departamento de Informática en Salud del Hospital Italiano de Buenos Aires, con una exposición titulada "*Investigación en la implementación de análisis del movimiento humano en instituciones de rehabilitación*". Las jornadas se desarrollaron los días 17-20 de noviembre de 2021 de forma virtual.

Otro indicador de la producción son las transferencias directas al medio socio productivo en formato de servicio. Durante el transcurso del presente proyecto, se realizaron servicios tanto a empresas nacionales, como internacionales y a consultorios, Centros y Hospitales de Rehabilitación.

Finalmente, consideramos que la formación de recursos humanos es el tercer indicador de producción digno de destacar. Además, de que los propios integrantes del PID han realizado cursos de perfeccionamiento y han finalizado su formación, en conjunto hemos dirigido en los tres años de duración de este proyecto 23 becas de

iniciación a la investigación, así como tesis de grado y postgrado. Dado que el Análisis del Movimiento Humano es un área de vacancia temática en el país, se considera de suma importancia la formación de futuros y nuevos profesionales.

## Bibliografía

- Agyenkwa, S. K., Yarfi, C., Banson, A. N., Kofi-Bediako, W. A., Abonie, U. S., Angmorterh, S. K., & Ofori, E. K. (2020). Assessing the Use of Standardized Outcome Measures for Stroke Rehabilitation among Physiotherapists in Ghana. *Stroke Research and Treatment*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9259017>
- Ainsworth, B., Cahalin, L., Buman, M., & Ross, R. (2015). The current state of physical activity assessment tools. *Progress in Cardiovascular Diseases*, 57(4), 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2014.10.005>
- Aloraini, S. M., Gäverth, J., Yeung, E., & MacKay-Lyons, M. (2015). Assessment of spasticity after stroke using clinical measures: a systematic review. *Disability and Rehabilitation*, 37(25), 2313–2323. <https://doi.org/10.3109/09638288.2015.1014933>
- Alotaibi, M., Long, T., Kennedy, E., & Bavishi, S. (2014). The efficacy of GMFM-88 and GMFM-66 to detect changes in gross motor function in children with cerebral palsy (CP): a literature review. *Disability and Rehabilitation*, 36(8), 617–627. <https://doi.org/10.3109/09638288.2013.805820>
- Ammann-Reiffer, C., Bastiaenen, C. H. G., de Bie, R. A., & van Hedel, H. J. A. (2014). Measurement Properties of Gait-Related Outcomes in Youth With Neuromuscular Diagnoses: A Systematic Review. *Physical Therapy*, 94(8), 1067–1082. <https://doi.org/10.2522/ptj.20130299>
- Arcila Cano, A., Ewins, D., Shaheen, A., & Catalfamo Formento, P. (2017). Evaluation of methods based on conventional videography for detection of gait events. In *IFMBE Proceedings* (Vol. 60). [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4086-3\\_46](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4086-3_46)
- Ashford, S., Brown, S., & Turner-Stokes, L. (2014). Systematic review of patient-reported outcome measures for functional performance in the lower limb. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 47(1), 9–17. <https://doi.org/10.2340/16501977-1889>
- Beauchet, O., Allali, G., Sekhon, H., Verghese, J., Guilain, S., Steinmetz, J.-P., ... Helbostad, J. L. (2017). Guidelines for Assessment of Gait and Reference Values for Spatiotemporal Gait Parameters in Older Adults: The Biomathics and Canadian Gait Consortiums Initiative. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11(August). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00353>
- Bertot, A., Barrera, V., Dutto, C. I., Bernal, C., & Catalfamo Formento, P. A. (2019a). ANÁLISIS DE MARCHA EN AMPUTADOS : PRUEBA PILOTO. *Prótesis, Ortesis y Movilidad*, 2(1), 34–37.
- Bertot, A., Barrera, V., Dutto, C. I., Bernal, M. C., & Catalfamo Formento, P. (2019b). ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO CLÍNICO. In *X Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad*.
- Broderick, J. P., Adeoye, O., & Elm, J. (2017). The Evolution of the Modified Rankin Scale and Its Use in Future Stroke Trials. *Stroke*, 37(1), 6–9. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.117.017866>.

- Brunelli, S., Sancesario, A., Iosa, M., Delussu, A. S., Gentileschi, N., Bonanni, C., ... Traballesi, M. (2019). Which Is the Best Way To Perform the Physiological Cost Index in Active Individuals With Unilateral Trans-Tibial Amputation? *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, 2(1). <https://doi.org/10.33137/cpoj.v2i1.32953>
- Buckley, E., Mazzà, C., & McNeill, A. (2018). A systematic review of the gait characteristics associated with Cerebellar Ataxia. *Gait and Posture*, 60(November 2017), 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.024>
- Cardona, N., Catalfamo Formento, P., Cherniz, A., Bonell, C. C. E., Catalfamo, P., Cherniz, A., & Bonell, C. C. E. (2014). Virtual platform technologies for evaluation of rehabilitation progress and for prosthetic control. In CLAIB (Ed.), *IV Latin American Conference on Biomedical Engineering. CLAIB* (Vol. 49). Paraná, Argentina. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13117-7\\_249](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13117-7_249)
- Catalfamo-Formento, P., Acevedo, R., Ghousayni, S., & Ewins, D. (2014). Gait Event Detection during Stair Walking Using a Rate Gyroscope. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(3), 5470–5485. <https://doi.org/10.3390/s140305470>
- Cherniz, A., Zapata, L., Zegalo, A., & Catalfamo Formento, P. (2017). Evaluación de VE-LOSTAT® para la medición de presión plantar. In *XVII Congreso Brasileiro de Biomecánica, I Encuentro Latinoamericano de Biomecánica y VIII Simposio en Neuromecánica Aplicada*.
- Cole, M. J., Cumming, J., Golland, N., Hayes, S., Ostler, C., Scopes, J., & Tisdale, L. (2014). *Bacpar Toolbox of Outcome Measures* (Second Edi). BACPAR UK.
- Comber, L., Galvin, R., & Coote, S. (2017). Gait deficits in people with multiple sclerosis: A systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*, 51, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.09.026>
- Coutinho, A. C. B., Neto, F. R., & Beraldo, P. S. S. (2014). Validity of heart rate indexes to assess wheeling efficiency in patients with spinal cord injuries. *Spinal Cord*, 52(9), 677–682. <https://doi.org/10.1038/sc.2014.107>
- De Grucci, C., Dutto, C. I., Barrera, V., Bernal, C., & Catalfamo Formento, P. A. (2017). Gait Analysis through a visual method to calculate temporal parameters : comparison of performance between the gait laboratory and the clinical setting. In *XXI Congreso de la Sociedad Argentina de Bioingeniería* (pp. 1–7).
- De Grucci, C., Dutto, C. I., Barrera, V., Bernal, C., Catalfamo Formento, P. A., Bonell, C. E., ... Catalfamo Formento, P. A. (2019). Gait Analysis through a visual method to calculate temporal parameters : comparison of performance between the gait laboratory and the clinical setting. *Revista Argentina de Bioingeniería*, 23(2), 3–8.
- De Grucci, C., Ewins, D., Shaheen, A., & Catalfamo Formento, P. (2016). Evaluation of a visual method to calculate temporal parameters. In *2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2016.7585312>
- Delussu, A. S., Morone, G., Iosa, M., Bragoni, M., Paolucci, S., & Traballesi, M. (2014). Concurrent Validity of Physiological Cost Index in Walking over Ground and during Robotic Training in Subacute Stroke Patients. *BioMed Research International*, 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/384896>
- Duró, C. I., Catalfamo Formento, P., & Bonell, C. E. (2019a). Aporte de herramientas de la bioingeniería para la protocolización de la evaluación de la rehabilitación. In *XXIII Congreso Argentino de Kinesiología* (Vol. 3).

- Duré, C. I., Catalfamo Formento, P., & Bonell, C. E. (2019b). Diseño y aplicación de un protocolo de valoración funcional de las patologías de rodilla en un Centro Médico de Rehabilitación. In *XXVII Jornadas de Jóvenes Investigadores* (pp. 1–9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Duré, C. I., Savio, J., Marengo, B., Perotti, G., Formento, P. C., & Bonell, C. E. (2020). Protocol for the Functional Evaluation of Patients with Knee Injury Treated in a Local Rehabilitation Centre. *IFMBE Proceedings*, 75, 907–912. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30648-9\\_117](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30648-9_117)
- Fredrickson, E., Ruff, R. L., & Daly, J. J. (2007). Physiological Cost Index as a proxy measure for the oxygen cost of gait in stroke patients. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 21(5), 429–434. <https://doi.org/10.1177/1545968307300400>
- Frisoli, M., Poux, S., Deris, M., Catalfamo-Formento, P., & Añino, E. G. (2022). Documentation tools development for rehabilitation technology implementation. In *XXIII Congreso Argentino de Bioingeniería* (pp. 1–5).
- Graham, H. K., Harvey, A., Rodda, J., Nattrass, G. R., & Pirpiris, M. (2004). The Functional Mobility Scale (FMS). *Journal of Pediatric Orthopedics*, 24(5), 514–520. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15308901>
- Hawkins, A. T., Henry, A. J., Crandell, D. M., & Nguyen, L. L. (2014). A systematic review of functional and quality of life assessment after major lower extremity amputation. *Annals of Vascular Surgery*, 28(3), 763. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/1521324261?accountid=17256>
- Himuro, N., Abe, H., Nishibu, H., Seino, T., & Mori, M. (2017). Easy-to-use clinical measures of walking ability in children and adolescents with cerebral palsy: a systematic review. *Disability and Rehabilitation*, 39(10), 957–968. <https://doi.org/10.1080/09638288.2016.1175036>
- Hood, V. L., Granat, M. H., Maxwell, D. J., & Hasler, J. P. (2002). A new method of using heart rate to represent energy expenditure: The total heart beat index. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(9), 1266–1273. <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.34598>
- Imam, B., Miller, W. C., McLaren, L., Chapman, P., & Finlayson, H. (2013). Feasibility of the Nintendo WiiFit for improving walking in individuals with a lower limb amputation. *SAGE Open Medicine*. <https://doi.org/10.1177/2050312113497942>
- Jaspers, E., Desloovere, K., Bruyninckx, H., Molenaers, G., Klingels, K., & Feys, H. (2009). Review of quantitative measurements of upper limb movements in hemiplegic cerebral palsy. *Gait & Posture*, 30(4), 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.07.110>
- Jaspers, E., Feys, H., Bruyninckx, H., Cutti, A., Harlaar, J., Molenaers, G., & Desloovere, K. (2011). The reliability of upper limb kinematics in children with hemiplegic cerebral palsy. *Gait & Posture*, 33(4), 568–575. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.01.011>
- Kim, M. O., Burns, A. S., Ditunno, J. F., & Marino, R. J. (2007). The Assessment of Walking Capacity Using the Walking Index for Spinal Cord Injury: Self-Selected Versus Maximal Levels. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 88(6), 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2007.03.021>
- Koumpouros, Y. (2016). A Systematic Review on Existing Measures for the Subjective Assessment of Rehabilitation and Assistive Robot Devices. *Journal of Healthcare Engineering*, 2016, 1048964. <https://doi.org/10.1155/2016/1048964>

- Lara Barrios, C. M., Catalfamo Formento, P., Muñoz Larrosa, E., & Blanco Ortega, A. (2020). Evaluation of the offline classification error of human locomotion modes using virtual force-sensing resistor data. In *Internacional Conference on Mechatronics, Electronics, and Automotive Engineering (ICMEAE)* (pp. 161–168).
- McGibbon, C. A., Sexton, A., Hughes, G., Wilson, A., Jones, M., O'Connell, C., ... Bonato, P. (2018). Evaluation of a toolkit for standardizing clinical measures of muscle tone. *Physiological Measurement*, 39(8), 085001. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aad424>
- Meijer, H. A., Graafland, M., Goslings, J. C., & Schijven, M. P. (2017). Systematic Review on the Effects of Serious Games and Wearable Technology Used in Rehabilitation of Patients With Traumatic Bone and Soft Tissue Injuries. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.10.018>
- Muñoz Larrosa, E., Dutto, C. I., Barrera, V., Bernal, C., & Catalfamo Formento, P. (2017). Intra and inter rate reliability of the amputee mobility predictor in the local clinical environment. In *Memorias del XVII Congreso Brasileiro de Biomecánica, I Encuentro Latinoamericano de Biomecánica y VIII Simposio en Neuromecánica Aplicada* (Vol. 1, pp. 3–4).
- Muñoz, R., Catalfamo Formento, P., & Bonell, C. E. (2019). Evaluation of a new metabolic cost indicator for gait analysis. *Revista Argentina de Bioingeniería*, 23(2), 8–11.
- Muñoz, R., Catalfamo Formento, P., Dutto, C. I., Dure, C. I., & Bonell, C. E. (2020). Evaluation of a protocol to measure the Total Heart Beat Index in research and clinical environments. *FMBE Proceedings*, 75, 1403–11409. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30648-9\\_181](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30648-9_181)
- Muro-de-la-Herran, A., García-Zapirain, B., & Méndez-Zorrilla, A. (2014). Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications. *Sensors (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/s140203362>
- Mutlu, A., Livanelioglu, A., & Gunel, M. K. (2008). Reliability of Ashworth and Modified Ashworth Scales in children with spastic cerebral palsy. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 9, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-9-44>
- Ntsiea, V., Mudzi, W., Maleka, D., Comley-White, N., & Pilusa, S. (2022). Barriers and facilitators of using outcome measures in stroke rehabilitation in South Africa. *International Journal of Therapy and Rehabilitation*, 29(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.12968/ijtr.2020.0126>
- P Ravera, E., A Catalfamo, P., J Crespo, M., A A Braidot, A., Ravera, E. P., Catalfamo, P. A., ... Braidot, A. A. (2012). Electromyography as an Important Parameter for a Proper Assessment of Dynamic Muscles Strength in Gait Analysis. *American Journal of Biomedical Engineering*, 2(6), 269–277. <https://doi.org/10.5923/j.ajbe.20120206.06>
- Peterson, M. V, Ewins, D., Shaheen, A., & Catalfamo Formento, P. A. (2015). Evaluation of Methods Based on Conventional Videography for Detection of Gait Events. In *IFMBE Proceedings* (Vol. 49, pp. 234–237). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13117-7>
- Pietrzak, S., & Jozwiak, M. (2001). Subjective and objective scales to assess the development of children cerebral palsy. *Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja*, 3(4), 487–489.
- Primosich, C. V, Molar-Battisti, M. A., Catalfamo-Formento, P., Valotto, V. O., & Bonell, C. E. (2022). Functional design of software to obtain spatio-temporal parameters of human gait. In *XXIII Congreso Argentino de Bioingeniería* (pp. 1–5).

- Profumieri, A., Bonell, C., Catalfamo, P., & Cherniz, A. (2016). Analysis of the times involved in processing and communication in a lower limb simulation system controlled by SEMG. *Journal of Physics: Conference Series*, 705, 12061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/705/1/012061>
- Riveras, M., Ravera, E., Shaheen, A. F. F., Ewins, D., & Catalfamo Formento, P. (2019). Spatio Temporal Parameters and Symmetry Index in Transtibial Amputees Wearing Prosthetic Feet with and without Adaptive Ankles. In *Pan American Health Care Exchanges, PAHCE* (Vol. 2019-March, pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GME-PE-PAHCE.2019.8717362>
- Riveras, Mauricio, Ravera, E., Ewins, D., Shaheen, A. F., & Catalfamo-Formento, P. (2020). Minimum toe clearance and tripping probability in people with unilateral transtibial amputation walking on ramps with different prosthetic designs. *Gait & Posture*, 81(December 2019), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.07.005>
- Riveras, Mauricio, Ravera, E. P., Shaheen, A. F., Ewins, D., & Catalfamo Formento, P. A. (2019). Spatio temporal parameters and symmetry in subjects ascending and descending a ramp, using three different prosthetic feet. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 00(0), 0–9. <https://doi.org/10.1007/s12206-000-0000-0>
- Rosa, M. C. N., Marques, A., Demain, S., Metcalf, C. D., & Rodrigues, J. (2014). Methodologies to assess muscle co-contraction during gait in people with neurological impairment – A systematic literature review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(2), 179. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1050641113002745>
- Ryan, J. M., Cassidy, E. E., Noorduy, S. G., & O'Connell, N. E. (2017, June). Exercise interventions for cerebral palsy. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011660.pub2>
- Sagawa, Y., Turcot, K., Armand, S., Thevenon, A., Vuillerme, N., & Watelain, E. (2011). Biomechanics and physiological parameters during gait in lower-limb amputees: a systematic review. *Gait & Posture*, 33(4), 511–526. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.003>
- Santisteban, L., Térémetz, M., Bleton, J.-P., Baron, J.-C., Maier, M. A., & Lindberg, P. G. (2016). Upper Limb Outcome Measures Used in Stroke Rehabilitation Studies: A Systematic Literature Review. *Plos One*, 11(5), e0154792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154792>
- Schulz, L. A., Paola, C. F., Emiliano, R., & Bonell, C. E. (2016). Evaluación de la sensibilidad y la especificidad de un método basado en umbral en la detección de la actividad electromiográfica durante la marcha. In *2016 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2016*. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2016.7585341>
- Shakti, D., Mathew, L., Kumar, N., & Kataria, C. (2018). Effectiveness of robo-assisted lower limb rehabilitation for spastic patients: A systematic review. *Biosensors and Bioelectronics*, 117, 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.06.027>
- Shull, P. B., Jirattigalachote, W., Hunt, M. A., Cutkosky, M. R., & Delp, S. L. (2014). Quantified self and human movement: A review on the clinical impact of wearable sensing and feedback for gait analysis and intervention. *Gait & Posture*, 40(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.03.189>
- Taylor-Rowan, M., Wilson, A., Dawson, J., & Quinn, T. J. (2018). Functional Assessment for Acute Stroke Trials: Properties, Analysis, and Application. *Frontiers in Neurology*.

- Vienne, A., Barrois, R. P., Buffat, S., Ricard, D., & Vidal, P. P. (2017). Inertial sensors to assess gait quality in patients with neurological disorders: A systematic review of technical and analytical challenges. *Frontiers in Psychology, 8*(MAY), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00817>
- Vllasolli, T. O., Orovcane, N., Zafirova, B., Krasniqi, B., Murtezani, A., Krasniqi, V., & Rama, B. (2015). Physiological cost index and comfort walking speed in two level lower limb amputees having no vascular disease. *Acta Informatica Medica, 23*(1), 12–17. <https://doi.org/10.5455/aim.2015.23.12-17>
- Völker, J. M., Shaheen, A., Ewins, D. J., Acevedo, R., & Catalfamo Formento, P. (2014). Comparison between defined and total areas of the foot for detection of gait events. In *IV Latin American Conference on Biomedical Engineering. CLAIB*. Parana, Argentina.
- Wang, Q., Markopoulos, P., Yu, B., Chen, W., & Timmermans, A. (2017). Interactive wearable systems for upper body rehabilitation: a systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 14*(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0229-y>
- Yamaguchi, T., Hvass Petersen, T., Kirk, H., Forman, C., Svane, C., Kofoed-Hansen, M., ... Lorentzen, J. (2018). Spasticity in adults with cerebral palsy and multiple sclerosis measured by objective clinically applicable technique. *Clinical Neurophysiology, 129*(9), 2010–2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.07.004>

**PID 6197 Denominación del Proyecto**

Desarrollo de herramientas cuantitativas para asistir en la toma de decisiones médicas relacionadas a discapacidades motrices

**Directora**

Paola Andrea Lucía Catalfamo Formento

**Codirectora**

Claudia Edith Bonell

**Unidad de Ejecución**

Universidad Nacional de Entre Ríos

**Dependencia**

Facultad de Ingeniería

**Cátedra/s, área o disciplina científica**

Ingenierías Y Tecnologías

**Instituciones intervinientes públicas o privadas.**

Instituto de investigación y desarrollo en bioingeniería y bioinformática. IBB (CONICET- UNER). Hospital de rehabilitación integral del discapacitado, Doctor Vera Candioti

**Contacto**

[pcatalfamo@ingenieria.uner.edu.ar](mailto:pcatalfamo@ingenieria.uner.edu.ar)

**Integrantes del proyecto**

Integrantes internos: Aldonate, Julio Alberto; Cherniz, Analía Soledad; García Añino, Eloísa; Merino, Gabriela Alejandra; Muñoz Larrosa, Eugenia; Ravera, Emiliano Pablo; Riveras, Mauricio. Integrantes externos: Barrera, Verónica; Dutto, César Ignacio. Becaria: Gutiérrez Candia, Leonel

**Fechas de iniciación y de finalización efectivas**

01/02/2019 y 24/12/2022

Aprobación del Informe Final por Resolución C.S. N° 132/23 (19-05-2023)