

GRADO EN CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y DEL DEPORTE

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

CURSO ACADÉMICO 2025-2026

¿Puede mejorar el rendimiento en programas de entrenamiento de la fuerza explosiva el uso de un modelo “day-to-day” con diferentes variables de monitorización para la toma de decisiones?

AUTOR: DAVID OLIVA MARTÍNEZ

TUTOR: MANUEL MOYA RAMÓN

ÍNDICE

Resumen	2
1. Introducción	3
2. Método	7
2.1. Participantes	7
2.2. Diseño experimental	7
2.3. Valoraciones	8
2.4. Análisis estadístico	12
3. Resultados	14
4. Discusión	20
5. Conclusiones y limitaciones	24
6. Referencias	26



Resumen

La autorregulación del entrenamiento mediante variables objetivas de monitorización diaria es una estrategia emergente en el entrenamiento de fuerza. El objetivo de este estudio exploratorio fue comparar tres estrategias — periodización tradicional prefijada (GPT), ajuste diario por variabilidad de la frecuencia cardíaca (GHRV) y ajuste diario por salto con contramovimiento (GCMJ) — sobre las adaptaciones neuromusculares tras seis semanas de entrenamiento de fuerza explosiva.

Doce varones jóvenes entrenados (21.2 ± 3.3 años) fueron asignados aleatoriamente a uno de los tres grupos ($n = 4$). Antes (pre) y después (post) de la intervención se evaluaron 1RM en sentadilla, perfil fuerza-velocidad vertical, CMJ con 0 % y 20 % del peso corporal, drop jump y sprint de 20 m. El análisis principal fue una ANCOVA con el valor post como variable dependiente, grupo como factor y pre como covariable, complementada con tamaños del efecto. El seguimiento diario mostró que el GCMJ modificó el 61.1 % de las sesiones con un índice neto de volumen de +1.60 % por sesión, frente al 31.9 % del GHRV con -1.32 % ($\chi^2 = 16.48$; $p = 0.00026$). En las variables de rendimiento no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$), pero se identificaron efectos grandes en desequilibrio fuerza-velocidad ($\eta^2p = 0.520$), 1RM ($\eta^2p = 0.478$) y drop jump ($\eta^2p = 0.411$). El GCMJ mostró las mayores mejoras en fuerza y potencia, y el GHRV en sprint y reactividad. Los resultados sugieren que el volumen efectivo permitido por cada estrategia condiciona el perfil de adaptación neuromuscular.

Palabras clave: autorregulación, HRV, CMJ, perfil fuerza-velocidad, entrenamiento de fuerza explosiva.

1. INTRODUCCIÓN

La fuerza explosiva, definida como la capacidad de producir la máxima fuerza en el menor tiempo posible, es un componente determinante del rendimiento en una gran mayoría de disciplinas deportivas. Acciones como el sprint, el salto o los cambios de dirección dependen directamente de la habilidad del sistema neuromuscular para generar altos ratios de desarrollo de la fuerza (RFD) (Maffiuletti et al., 2016). El RFD no solo se relaciona con la fuerza máxima del deportista, sino también con factores neurales como la frecuencia de impulso y el reclutamiento de unidades motoras, lo que subraya la importancia de la calidad y la velocidad de la contracción muscular (Maffiuletti et al., 2016). Por ello, el diseño de programas de entrenamiento que optimicen esta cualidad es un objetivo prioritario para entrenadores y científicos del deporte.

La habilidad para ejecutar contracciones musculares rápidas durante saltos, sprints o cambios de dirección está estrechamente relacionada con la capacidad de acelerar el peso corporal al máximo en el menor tiempo posible. Esta habilidad depende de altos niveles de fuerza, potencia y velocidad generada durante la fase de empuje, y está vinculada a las propiedades mecánicas del sistema neuromuscular (Jiménez-Reyes et al., 2019). El rendimiento en acciones explosivas, como los saltos, se ve influenciado por la máxima potencia (P_{max}) que los miembros inferiores pueden generar, así como por la combinación de capacidades para producir fuerza a diferentes velocidades, conocida como el perfil F-V (Jiménez-Reyes et al., 2019). El perfil F-V se puede determinar mediante saltos verticales con diferentes cargas, obteniendo variables como F_0 , que se refiere a la fuerza máxima teórica generada por los miembros inferiores cuando la velocidad es cero, y P_{max} , el punto más alto de la relación entre fuerza y velocidad, los cuales se han asociado significativamente con el rendimiento en el cambio de dirección (Baena-Raya et al., 2021).

Históricamente, la planificación del entrenamiento de fuerza se ha basado en modelos de periodización tradicionales, como la periodización lineal o por bloques (Issurin, 2010). Estos modelos establecen una progresión de cargas de forma predeterminada a lo largo de microciclos y mesociclos con el fin de inducir una supercompensación (Issurin, 2010). Sin embargo, una de sus principales limitaciones es su rigidez, ya que no tienen en cuenta la respuesta individual y la variabilidad diaria del estado de recuperación del deportista, que puede verse afectado por factores estresantes tanto físicos como extradeportivos (Issurin, 2010).

Frente a estas aproximaciones, en la última década han surgido modelos de entrenamiento flexibles y autorregulados, denominados "day-to-day" (Bell et al., 2020). Estos sistemas proponen ajustar la carga de entrenamiento diaria en función del estado de preparación del atleta, medido a través de indicadores objetivos y no invasivos. Este enfoque permite individualizar el estímulo para asegurar que el deportista entrene con la carga óptima en cada momento, potenciando la adaptación y previniendo estados de fatiga excesiva o sobreentrenamiento no funcional (Non Functional Overreaching, NFO) (Bell et al., 2020).

Independientemente de la organización temporal de la carga (rígida o flexible), el desarrollo de la fuerza explosiva se fundamenta en una combinación de métodos de entrenamiento específicos. La literatura científica avala un enfoque multifacético que incluye, por un lado, el entrenamiento de la fuerza máxima (p. ej., con cargas pesadas), esencial para elevar el potencial de fuerza y mejorar el RFD en fases tempranas (Seitz et al., 2014). Por otro lado, se emplean métodos orientados a la velocidad, como el entrenamiento pliométrico, que optimiza la utilización del ciclo estiramiento-acortamiento (CEA) y la capacidad reactiva del sistema musculotendinoso (Markovic & Mikulic, 2010). Finalmente, el entrenamiento balístico (p. ej., saltos con carga o lanzamientos), donde se acelera una masa a la máxima velocidad posible, se considera fundamental para mejorar la parte alta de la curva F-V y la potencia (Maffiuletti et al., 2016). El diseño de la intervención de este estudio integrará estos tres métodos para asegurar un estímulo completo.

Una de las herramientas más utilizadas en la última década para monitorizar el estado de fatiga y la capacidad de rendimiento del deportista es la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (Heart Rate Variability, HRV). La HRV, que analiza las variaciones en los intervalos R-R sucesivos, refleja el estado del sistema nervioso autónomo (SNA) y, concretamente, el equilibrio entre sus ramas simpática y parasimpática (Bellenger et al., 2016). El entrenamiento actúa como un estímulo estresor que altera la homeostasis del organismo; la recuperación es el proceso mediante el cual el SNA restaura este equilibrio. Un predominio de la actividad parasimpática (indicado por una HRV más alta) se asocia con un buen estado de recuperación y adaptación, mientras que una disminución de la HRV puede señalar un estado de fatiga o estrés acumulado (Moya-Ramón et al., 2022).

La HRV se utiliza en la actualidad, sobre todo, como una variable eficaz para prescribir la carga de entrenamiento de forma individualizada en deportes de resistencia (Javaloyes et al., 2018). El avance tecnológico ha sido clave para la implementación práctica de estos modelos, especialmente con la validación de aplicaciones para smartphones (p. ej., HRV4Training, Elite HRV) (Javaloyes et al., 2021; Moya-Ramón et al., 2022). Esta accesibilidad, que permite mediciones fiables mediante fotopletismografía (PPG) o bandas de registro de cardiofrecuencia (Polar H10), facilita la adherencia necesaria para aplicar algoritmos de decisión diarios, tal y como proponen los modelos de prescripción del entrenamiento guiados por la HRV (Javaloyes et al., 2018).

Para cuantificar la HRV en el contexto deportivo, se utiliza predominantemente el parámetro del dominio del tiempo rMSSD (raíz cuadrada de la media de las diferencias al cuadrado entre intervalos R-R sucesivos). Este índice ha demostrado ser el más fiable para evaluar la modulación vagal (parasimpática) en registros de corta y ultracorta duración, siendo menos sensible a los artefactos respiratorios (Plews et al., 2012). Con el fin de interpretar las fluctuaciones diarias del rMSSD, se establece un período basal para calcular el "Mínimo Cambio Detectable" o *Smallest Worthwhile Change* (SWC). El SWC crea una horquilla o rango de normalidad individualizado, que permite al entrenador diferenciar entre las oscilaciones triviales

de la HRV y los cambios fisiológicamente significativos. Comúnmente, este rango se calcula a partir de la media móvil de 7 días del valor de rMSSD (previamente normalizado mediante logaritmo natural, LnRMSSD) $\pm$ un múltiplo de su desviación estándar (SD), por ejemplo, $0.5 \times SD$ (Javaloyes et al., 2018). De este modo, si el valor diario de HRV se mantiene dentro del SWC, se considera que el deportista está en un estado de homeostasis y preparado para asimilar la carga. Por el contrario, si el valor cae por debajo de este umbral, se interpreta como una señal de fatiga que aconseja reducir la intensidad o descansar (Javaloyes et al., 2018).

Para llevar a la práctica este modelo de entrenamiento, se utilizan algoritmos de toma de decisiones que guían la prescripción de la carga diaria. En la Figura 1 se presenta un ejemplo de dicho algoritmo, basado en el propuesto por Javaloyes et al. (2018). Este flujograma ilustra cómo la medición matutina de la HRV, comparada con el rango de normalidad del atleta (el SWC), determina la intensidad de la sesión del día. Cuando el valor de HRV es estable o superior a la normalidad (HRV+), el modelo permite la introducción de un estímulo de alta intensidad. Por el contrario, si el valor de HRV cae por debajo del umbral de normalidad (HRV-), indicando un estado de fatiga, el algoritmo prescribe una reducción de la carga, optando por una sesión de baja intensidad o un día de descanso completo para facilitar la recuperación y la supercompensación. De este modo, el proceso de entrenamiento se convierte en un sistema dinámico que se ajusta continuamente al estado fisiológico del deportista.

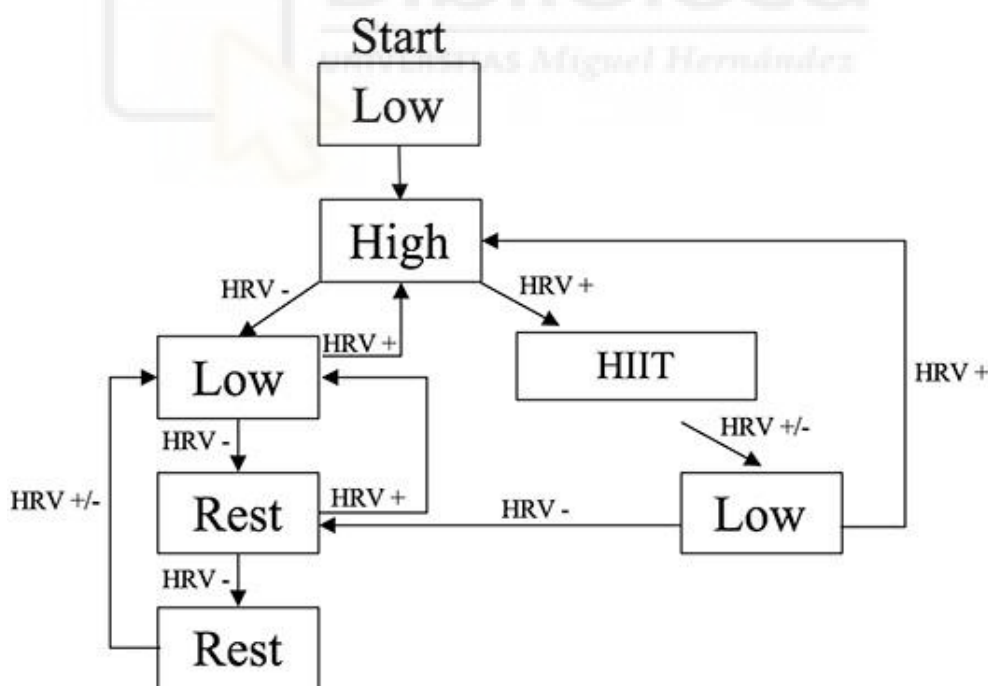


Figura 1. Ejemplo de algoritmo de toma de decisiones para la prescripción del entrenamiento diario basado en la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV). Adaptado de Javaloyes et al. (2018).

Paralelamente, la monitorización del estado neuromuscular es crucial en el entrenamiento de la fuerza explosiva. El salto con contramovimiento (CMJ) se ha consolidado como una herramienta válida, fiable y sensible para detectar la fatiga neuromuscular. Una disminución en la altura del salto puede indicar una reducción en la capacidad del sistema neuromuscular para producir fuerza rápidamente (Claudino et al., 2017). Este rendimiento en el salto es un reflejo directo de la eficiencia neuromuscular, incluyendo la capacidad de utilizar el ciclo de estiramiento-acortamiento (CEA) y la sincronización de las unidades motoras. Para interpretar estos cambios, también se podría utilizar el tamaño del efecto (Effect Size, ES), tal y como lo indica Francini (sin publicar) en sus trabajos con judokas internacionales. El ES es un cálculo estadístico que permite determinar si la variación diaria en el rendimiento del salto es significativa en comparación con la línea base del sujeto, ofreciendo así un criterio objetivo para decidir si mantener, aumentar o disminuir la carga de entrenamiento planificada. Para tomar ese tipo de decisiones el valor de ES se contrasta con la escala de Rhea (2004). En concreto, el tamaño del efecto se calcula comparando el valor del CMJ del día con la media y la desviación estándar de un período de referencia (línea base) del propio sujeto, tal y como se muestra en la figura 2.

$$TE = \frac{(\text{CMJ de hoy} - \text{CMJ medio de la línea base})}{\text{Desviación Estándar de la línea base}}$$

Figura 2. Fórmula para el cálculo del Tamaño del Efecto (ES)

De este modo, se obtiene un valor estandarizado que cuantifica la magnitud del cambio, permitiendo establecer umbrales objetivos para la toma de decisiones. Por ejemplo, un tamaño del efecto pequeño podría indicar que el atleta se encuentra en un estado de normalidad, mientras que un valor negativo considerable podría ser un claro indicador de fatiga que justifique una reducción de la carga (Francini, E., SP).

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo comparar la eficacia de un programa de entrenamiento de fuerza explosiva basado en un modelo de periodización tradicional frente a dos modelos "day-to-day": uno guiado por la HRV y otro por el tamaño del efecto sobre los datos de evaluación diario del CMJ. Aunque la utilidad de la HRV y el CMJ como herramientas de monitorización ha sido estudiada de forma aislada, existe una escasez de investigaciones que comparen directamente su efectividad para guiar la prescripción del entrenamiento de fuerza explosiva frente a un enfoque tradicional en un mismo estudio. La hipótesis de partida es que, la toma de decisiones diaria basada en estas variables de monitorización, puede optimizar los estímulos de entrenamiento y generar mayores mejoras en el rendimiento del tren inferior que la periodización tradicional.

2. MÉTODO

2.1 PARTICIPANTES.

En el presente estudio participaron un total de 12 varones jóvenes entrenados (edad: 21.2 ± 3.3 años; masa corporal: 75.6 ± 14.4 kg; altura: 175.4 ± 5.0 cm), con un mínimo de 1 año de experiencia en entrenamiento de fuerza. Todos los participantes fueron informados detalladamente, tanto de forma oral como escrita, sobre los procedimientos, posibles riesgos y beneficios del estudio antes de firmar el consentimiento informado. La investigación fue aprobada por la Oficina de Investigación Responsable, con el código TFG.GAF.MMR.DOM.251017.

Los criterios de inclusión fueron:

- a) No presentar ninguna lesión musculoesquelética o condición médica que impida la realización de los test o entrenamientos de alta intensidad.

Los criterios de exclusión fueron:

- a) El consumo de fármacos o suplementos que puedan afectar al sistema nervioso autónomo o al rendimiento neuromuscular.
- b) Estar participando en otro estudio de investigación de forma simultánea.
- c) Estar inmerso en cualquier actividad deportiva planificada que utilice entrenamientos de desarrollo de la fuerza muscular.

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.

Se empleó un diseño exploratorio longitudinal con una duración total de 9 semanas. Los 12 participantes fueron asignados de forma aleatoria a uno de los tres grupos de intervención ($n = 4$ por grupo):

- Grupo de entrenamiento prefijado (GPT): realizó un programa de entrenamiento con periodización tradicional prefijada.
- Grupo de entrenamiento guiado por HRV (GHRV): realizó el mismo programa, pero la carga diaria se ajustó en función de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca matutina.
- Grupo de entrenamiento guiado por CMJ (GCMJ): realizó el mismo programa, pero la carga diaria se ajustó en función del rendimiento en el Salto con Contramovimiento medido antes de la sesión.

El estudio se estructuró en cuatro fases que se detallan a continuación y que se resumen gráficamente en la Figura 3:

1. Semana 1: valoración basal (VB) de la HRV durante 7 días (lunes a domingo) y del CMJ durante 5 días (lunes a viernes) para establecer los valores de referencia individuales.
2. Semana 2: familiarización con los protocolos de prueba y realización de las valoraciones iniciales (VPRE), distribuidas en tres sesiones separadas por 48 horas.
3. Semanas 3-8: período de intervención de 6 semanas de entrenamiento, con 3 sesiones por semana separadas por 48 horas.
4. Semana 9: realización de las valoraciones finales (VPOST) con el mismo esquema que la VPRE, transcurridas 48-72 horas desde la última sesión de entrenamiento para asegurar la recuperación.

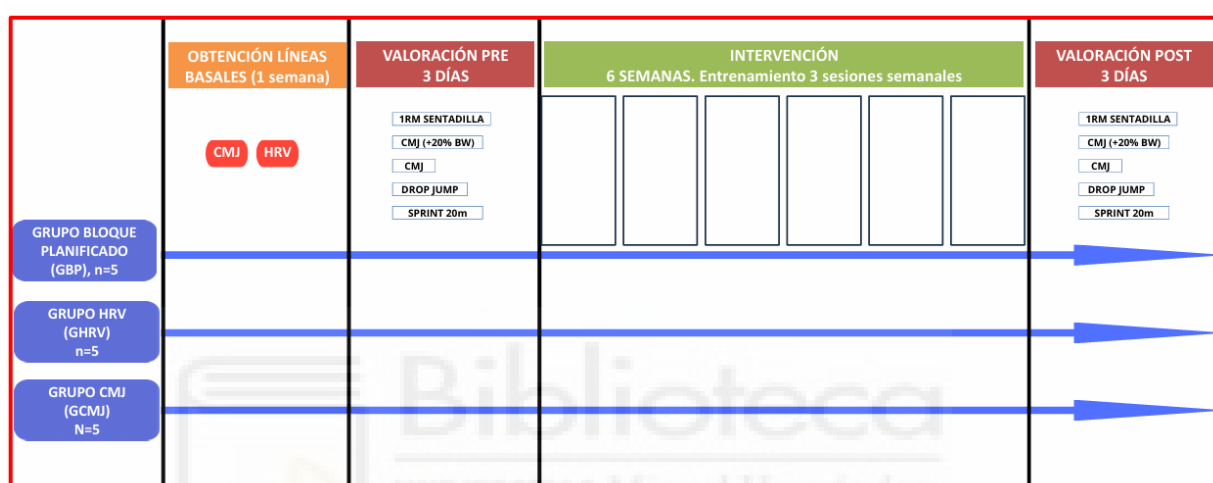


Figura 3. Cronograma del estudio. Representación esquemática de las fases del protocolo: obtención de líneas basales, valoración pre, período de intervención de 6 semanas y valoración post, junto con la distribución de los grupos experimentales y la batería de test aplicada en las valoraciones.

2.3 VALORACIONES.

Para garantizar la validez y fiabilidad de los datos, así como para evitar la interferencia de la fatiga, el cronograma de valoración se organizó respetando estrictamente los tiempos de adaptación. El proceso comenzó con una Semana 1 destinada a la Valoración Basal (VB), registrando la HRV diariamente (lunes a domingo) y el CMJ (lunes a viernes). Posteriormente, durante la Semana 2, se llevó a cabo la familiarización con los protocolos y la realización de las valoraciones iniciales (VPRE), distribuidas en tres sesiones separadas por 48 horas. Este mismo esquema se replicó en la Valoración Final (VPOST), que tuvo lugar en la Semana 9, asegurando un periodo de 48-72 horas de descanso tras la última sesión de las 6 semanas de intervención.

2.3.1 Valoración basal.

Durante la **Semana 1 (Familiarización)**, además de las pruebas de rendimiento, se recopilaron los datos de todos los grupos (incluido el grupo de entrenamiento prefijado) para establecer los valores de referencia individuales que guiaron la toma de decisiones diaria:

- **Línea Basal HRV (Grupo GHRV):** Se registró la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca matutina diariamente durante los 7 días de la semana mediante la app de HRV4training para calcular la media y el Smallest Worthwhile Change (SWC). Esta aplicación emplea la técnica de fotoplethysmografía (PPG) utilizando la cámara del smartphone para detectar los cambios en el volumen sanguíneo y determinar los intervalos R-R. Dicha herramienta ha demostrado ser válida y fiable para la medición de la HRV en reposo en comparación con la electrocardiografía tradicional, facilitando la monitorización diaria no invasiva en el ámbito deportivo (Moya-Ramón et al., 2022). Se registró el logaritmo natural de la raíz cuadrada de la media de las diferencias al cuadrado entre intervalos R-R sucesivos (LnRMSSD), por ser el índice más fiable para la modulación vagal (Plews et al., 2012).
- **Línea Basal CMJ (Grupo GCMJ):** durante esta semana se obtuvo el rendimiento basal en CMJ que permitiría posteriormente cuantificar la fluctuación diaria del estado neuromuscular del sujeto. Cada participante realizó 3 saltos máximos al inicio de cada sesión durante 5 días consecutivos (lunes a viernes), con 1 minuto de descanso entre intentos, registrándose la mejor altura de vuelo de cada día mediante una plataforma de contacto (Chronojump Boscosystem, Barcelona, España). Con los 5 valores de altura recogidos durante la semana se calcularon la media y la desviación estándar (DE) de referencia, que constituirían la línea basal individualizada del sujeto. Una vez iniciada la intervención, antes de cada sesión de entrenamiento, el sujeto realizaría también 3 CMJ máximos y la mejor altura del día se compararía con la línea basal mediante el cálculo del Tamaño del Efecto diario ($ES = (CMJ_{\text{día}} - media_{\text{basal}}) / DE_{\text{basal}}$; ver Figura 2). En función del valor obtenido y siguiendo la escala de Rhea (2004), se establecieron tres umbrales de decisión: $ES > +0.6$ indicaba un estado óptimo y se aplicaba un incremento de carga (+10 %); ES entre -0.6 y $+0.6$ indicaba normalidad y se mantenía la carga prefijada; $ES < -0.6$ indicaba fatiga y se aplicaba una reducción de carga (-15 %). El procedimiento completo se ilustra en la Figura 4.

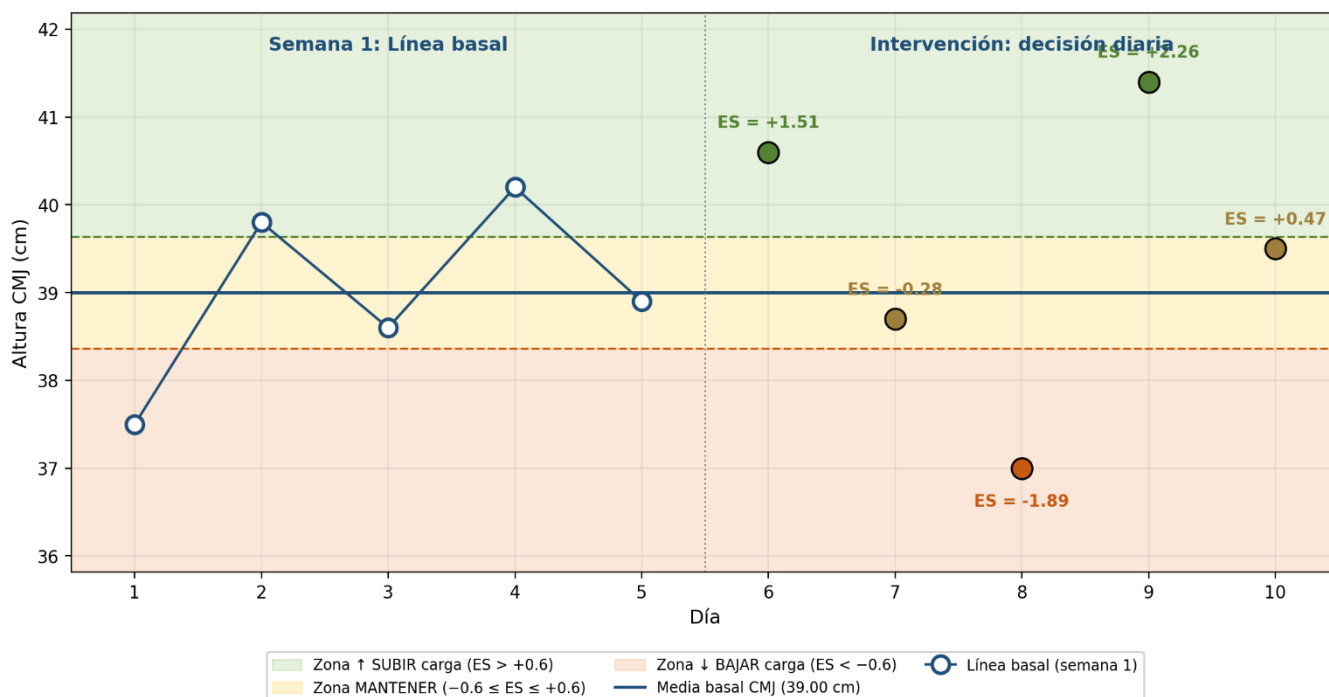


Figura 4. Procedimiento de cálculo del ES diario sobre la altura de CMJ y toma de decisión sobre la carga del entrenamiento. Durante la semana 1 (línea basal) se calculan la media y la DE de las alturas de vuelo. Durante la intervención, cada altura diaria se transforma en un ES respecto a esa línea basal. Los umbrales de decisión (escala de Rhea, 2004) determinan si la carga prefijada se incrementa (+10 %), se mantiene o se reduce (-15 %).

2.3.2 Valoración pre y post:

Dado que la fuerza explosiva es una cualidad multifactorial, su evaluación requiere una batería de pruebas que valore sus diferentes componentes. Todos los participantes completaron seis sesiones de valoración idénticas (VPRE y VPOST), realizadas en el mismo orden y bajo las mismas condiciones. En este estudio, la medición del rendimiento no se limitará a una sola variable, sino que buscará una visión integral del perfil neuromuscular de los participantes. La batería de pruebas y sus evaluaciones se organizaron de la siguiente manera:

- **Día 1:** Evaluación del Perfil Fuerza-Velocidad (Squat Jump con cargas).
- **Día 2:** Evaluación de la Fuerza Máxima (1RM estimado mediante VBT) y Fuerza Reactiva (Drop Jump).
- **Día 3:** Evaluación del Salto con Contramovimiento (CMJ con 0% y 20% de carga) y Rendimiento en Aceleración (Sprints 20m).

1. Perfil Fuerza-Velocidad (F-V): Para valorar la aplicación de la fuerza a diferentes velocidades, se determinó el perfil F-V del tren inferior. Este se determinó mediante saltos verticales con cargas crecientes (en este caso se realizó SJ con las siguientes cargas 0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 70% de la masa corporal). Para el registro de la altura y la velocidad media de cada salto se utilizó un encoder lineal (Speed4Lifts, Madrid, España). Este dispositivo ha

demostrado ser válido y fiable para la medición de la velocidad media propulsiva en comparación con el *Gold Standard* (Pérez-Castilla et al., 2019). Los datos fueron transmitidos vía Bluetooth y registrados en la aplicación oficial de Speed4Lifts para su posterior análisis. El análisis de los datos se llevó a cabo introduciendo los valores de masa (resistencia) y altura de vuelo en la hoja de cálculo específica de Microsoft Excel diseñada y validada por Samozino et al. (2008) y Jiménez-Reyes et al. (2017) A partir de las alturas de salto y las masas utilizadas, se calcularán variables clave como la fuerza máxima teórica (F_0), la velocidad máxima teórica (V_0) y la potencia máxima (P_{max}), que se han asociado significativamente con el rendimiento en acciones balísticas como el salto vertical, el sprint y los cambios de dirección (Jiménez-Reyes et al., 2019; Baena-Raya et al., 2021).

2. Fuerza máxima (1RM estimado mediante velocity-based training). Se estimó el 1RM en sentadilla trasera (Back Squat) mediante la construcción de un perfil carga-velocidad individualizado utilizando un rack, una barra olímpica de 20 kg, discos calibrados y un encoder lineal (Speed4Lifts, Madrid, España). Tras un calentamiento estandarizado, los participantes realizaron series con 3 cargas progresivas, correspondientes aproximadamente al 30 %, 60 % y 80 % del 1RM estimado (basado en la experiencia previa del sujeto o en valores normativos). En cada carga se instruyó al sujeto a realizar 3 repeticiones a la máxima velocidad intencional en la fase concéntrica, con 3 minutos de recuperación entre series. Se registró la mejor velocidad media propulsiva (VMP) de cada carga. A partir de los 3 pares de datos (carga en kg y velocidad en m/s) se generó una recta de regresión lineal individual ($R^2 > 0.95$) y el 1RM se estimó calculando la carga teórica asociada a una velocidad de 0.30 m/s (Sánchez-Medina et al., 2017).

3. Fuerza Reactiva (DJ): Finalmente, para medir la capacidad de utilizar el ciclo estiramiento-acortamiento (CEA) de forma rápida y eficiente, se utilizó el Drop Jump (DJ). Los participantes se dejaron caer desde una altura estandarizada (40 cm) y realizó un salto vertical máximo intentando minimizar el tiempo de contacto sobre la plataforma de contacto descrita anteriormente (Chronojump, BoscoSystem). El registro preciso del tiempo de contacto en milisegundos y la altura de vuelo permitió calcular el Índice de Fuerza Reactiva (RSI). Esta prueba permite calcular el Índice de Fuerza Reactiva (RSI) (Altura de salto / Tiempo de contacto), un indicador clave de la rigidez (*stiffness*) y la capacidad elástica del sistema musculotendinoso (Flanagan & Comyns, 2008)

4. Salto con contramovimiento (CMJ). Se realizó el salto con contramovimiento para evaluar la capacidad de salto utilizando el ciclo estiramiento-acortamiento, basándose en el protocolo original de Bosco et al. (1983). La medición se realizó mediante una plataforma de contacto (Chronojump Boscosystem, Barcelona, España). El protocolo de ejecución fue el siguiente: el sujeto partió de una posición erguida con las manos en las caderas para evitar la contribución del tren superior, realizó un movimiento rápido de flexo-extensión de rodillas seguido inmediatamente de un salto vertical máximo, y aterrizó con la punta de los pies manteniendo las piernas extendidas durante el vuelo. Se realizaron 3 intentos con 2 minutos de recuperación, registrando la mejor marca obtenida. Este protocolo se repitió para dos condiciones: CMJ con peso corporal (0 % carga) y CMJ con carga externa del 20 % del peso corporal.

5. Rendimiento en aceleración (Sprint 20 m). Se evaluó la capacidad de aceleración mediante un test de sprint de 20 metros. El tiempo se registró utilizando un sistema de células fotoeléctricas inalámbricas (Witty System, Microgate, Bolzano, Italia) colocadas al inicio (0 m), a los 5 m y al final (20 m), ajustadas a la altura de la cadera. La barrera intermedia a los 5 m permitió obtener el tiempo parcial en la fase de aceleración inicial, particularmente sensible a la fuerza explosiva del tren inferior. Los participantes realizaron un calentamiento específico de carrera y salidas. La salida se realizó desde una posición estática de dos apoyos (split stance), con el pie delantero colocado 30 cm detrás de la línea de salida. Se realizaron 2 intentos máximos con 3 minutos de recuperación pasiva completa entre ellos, seleccionándose el mejor tiempo para el análisis.

2.4 Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva, expresándose como media $\pm$ desviación estándar (DE) para las variables continuas. La distribución de los datos se comprobó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la inspección visual de gráficos cuantil-cuantil (Q-Q). La homogeneidad de varianzas se evaluó con la prueba de Levene. Dado el diseño pre-post con tres grupos independientes, el análisis principal para cada variable de rendimiento consistió en un modelo de análisis de la covarianza (ANCOVA), utilizando el valor postintervención como variable dependiente, el grupo (GPT, GHRV, GCMJ) como factor fijo y el valor preintervención correspondiente como covariable. Este enfoque se eligió siguiendo la recomendación metodológica de Vickers y Altman (2001), que demostraron la superioridad del ANCOVA frente al análisis del cambio (Δ) en diseños pre-post con grupos, al controlar estadísticamente el valor basal y reducir el sesgo por regresión a la media. Asimismo, se verificó la homogeneidad de las pendientes de regresión mediante la interacción grupo $\times$ valor basal.

Cuando el efecto principal de grupo fue significativo, se realizaron comparaciones post hoc por pares sobre las medias ajustadas aplicando la corrección de Holm para minimizar el error tipo I asociado a las comparaciones múltiples. Para aquellas variables en las que no se cumplieron adecuadamente los supuestos del modelo paramétrico, concretamente F_0 , V_0 y el desequilibrio fuerza-velocidad, se emplearon versiones robustas o basadas en permutación del modelo ANCOVA, que no dependen de las distribuciones teóricas y son más fiables con muestras pequeñas.

Como análisis complementario se calcularon los cambios absolutos (Δ = post – pre) y los cambios intragrupo pre-post se exploraron mediante pruebas t para muestras relacionadas o, cuando procedía, mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. Los tamaños del efecto se informaron mediante el eta cuadrado parcial (η^2_p) para el factor grupo de la ANCOVA, mediante Hedges (g_{av}) para los cambios intragrupo y mediante Hedges (g_{delta}) para las diferencias del cambio entre grupos, todos ellos con sus intervalos de confianza del 95 % (Lakens, 2013). Los valores de η^2_p se interpretaron como pequeño (≈ 0.01), moderado (≈ 0.06) y grande (≈ 0.14) según Cohen (1988), y los valores de g como pequeño (≈ 0.2), moderado (≈ 0.5) y grande (≈ 0.8).

Las variables edad, peso corporal y altura se analizaron únicamente con fines descriptivos y para caracterizar la comparabilidad basal entre grupos mediante ANOVA de un factor o la prueba de Kruskal-Wallis cuando no se cumplieron los supuestos de normalidad.

Adicionalmente, las decisiones diarias de carga registradas durante las 6 semanas de intervención se analizaron como variable categórica (subir / bajar / mantener) para caracterizar la dosis efectiva de entrenamiento aplicada en cada grupo. Para ello se calculó por grupo el porcentaje de sesiones modificadas y un índice neto de volumen ponderado por sesión $[(n^{\circ} \text{ sesiones } \uparrow \times +10\%) + (n^{\circ} \text{ sesiones } \downarrow \times -15\%)] / n^{\circ} \text{ total de sesiones}$. La comparación entre los grupos GHRV y GCMJ — únicos grupos en los que se modificó la carga — se realizó mediante la prueba de chi-cuadrado de Pearson (χ^2) sobre la distribución de decisiones, complementada con la prueba exacta de Fisher como confirmación robusta dado el reducido tamaño muestral. El tamaño del efecto del contraste entre grupos se calculó mediante Hedges g.

El nivel de significación se estableció en $p < 0.05$ con un enfoque bilateral. Todos los análisis se realizaron con el software JASP (versión 0.19, Universidad de Ámsterdam, Países Bajos).



BIBLIOGRAFIA.

- Baena-Raya, A., Rodríguez-Pérez, M. A., Jiménez-Reyes, P., & Soriano-Maldonado, A. (2021). Maximizing acceleration and change of direction in sport: A case series to illustrate how the force-velocity profile provides additional information to that derived from linear sprint time. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), 6140. <https://doi.org/10.3390/ijerph18116140>
- Bell, L., Ruddock, A., Maden-Wilkinson, T., & Rogerson, D. (2020). Overreaching and overtraining in strength sports and resistance training: A scoping review. *Journal of Sports Sciences*, 38(16), 1897–1912. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1763077>
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016). Monitoring Athletic Training Status Through Autonomic Heart Rate Regulation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 46(10), 1461–1486. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0484-2>
- Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 50(2), 273–282. <https://doi.org/10.1007/BF00422166>
- Claudino, J. G., Cronin, J., Mezêncio, B., McMaster, D. T., McGuigan, M., Tricoli, V., Amadio, A. C., & Serrão, J. C. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(4), 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2016.08.011>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.4324/9780203771587v>
- Cunanan, A. J., DeWeese, B. H., Wagle, J. P., Carroll, K. M., Sausaman, R., Hornsby, W. G., Haff, G. G., Triplett, N. T., Pierce, K. C., & Stone, M. H. (2018). The general adaptation syndrome: A foundation for the concept of periodization. *Sports Medicine*, 48(4), 787–797. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0855-3>
- Flanagan, E. P., & Comyns, T. M. (2008). The use of contact time and the reactive strength index to optimize fast stretch-shortening cycle training. *Strength and Conditioning Journal*, 30(5), 10–15. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e318187e25b>
- Gathercole, R. J., Stellingwerff, T., & Sporer, B. C. (2015). Effect of taper on endurance and neuromuscular performance in triathletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(12), 3317–3325. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000995>
- González-Badillo, J. J., & Sánchez-Medina, L. (2010). Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *International Journal of Sports Medicine*, 31(5), 347–352. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1248333>
- Issurin, V. B. (2010). New Horizons for the Methodology and Physiology of Training Periodization. *Sports Medicine*, 40(3), 189–206. <https://doi.org/10.2165/11319770-000000000-00000>

- Javaloyes, A., Mateo-March, M., Manresa-Rocamora, A., Sanz-Quinto, S., & Moya-Ramón, M. (2021). The use of a smartphone application in monitoring hrv during an altitude training camp in professional female cyclists: A preliminary study. *Sensors*, 21(16), 5497. <https://doi.org/10.3390/s21165497>
- Javaloyes, A., Sarabia, J. M., Lamberts, R. P., & Moya-Ramon, M. (2018). Training Prescription Guided by Heart-Rate Variability in Cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(1), 23–32. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2018-0122>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brughelli, M., & Morin, J. B. (2017). Effectiveness of an individualized training program on force-velocity-power profile in athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(5), 593–600. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00677>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., & Morin, J. B. (2019). Optimized training for jumping performance using the force-velocity imbalance: Individual adaptation kinetics. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216681>
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., & Tulppo, M. P. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European Journal of Applied Physiology*, 101(6), 743–751. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0552-2>
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4, 863. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: Physiological and methodological considerations. *European Journal of Applied Physiology*, 116(6), 1091–1116. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3346-6>
- Markovic, G., & Mikulic, P. (2010). Neuro-musculoskeletal and performance adaptations to lower-extremity plyometric training. *Sports Medicine*, 40(10), 859–895. <https://doi.org/10.2165/11318370-000000000-00000>
- Moya-Ramon, M., Mateo-March, M., Peña-González, I., Zabala, M., & Javaloyes, A. (2022). Validity and reliability of different smartphones applications to measure HRV during short and ultra-short measurements in elite athletes. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 217, 106696. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.106696>
- Pérez-Castilla, A., Piepoli, A., Delgado-García, G., Garrido-Blanca, G., & García-Ramos, A. (2019). Reliability and concurrent validity of seven commercially available devices for the assessment of movement velocity at different intensities during the bench press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(5), 1258–1265. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003118>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11), 3729–3741. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2354-4>

Rhea, M. R. (2004). Determining the magnitude of treatment effects in strength training research through the use of the effect size scale. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(4), 918–920. <https://doi.org/10.1519/00124278-200411000-00040>

Samozino, P., Morin, J. B., Hintzy, F., & Belli, A. (2008). A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *Journal of Biomechanics*, 41(14), 2940–2945. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.07.028>

Sánchez-Medina, L., Pallarés, J. G., Pérez, C. E., Morán-Navarro, R., & González-Badillo, J. J. (2017). Estimation of relative load from bar velocity in the full back squat exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(5), 1202–1210. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001818>

Schoenfeld, B. J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 35(11) 1073-1082. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1210197>

Seitz, L. B., Reyes, A., Tran, T. T., Saez de Villarreal, E., & Haff, G. G. (2014). Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: a systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*, 44(12), 1693–1702. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0227-1>

Vickers, A. J., & Altman, D. G. (2001). Analysing controlled trials with baseline and follow up measurements. *BMJ*, 323(7321), 1123-1124. <https://doi.org/10.1136/bmj.323.7321.1123>

