

# TECNOLOGÍA GPS AL SERVICIO DEL DEPORTE

## (GPS APPLICATIONS IN SPORT SCIENCE)

### **Autores:**

**Luis Sánchez Medina**

Doctorando en el Programa “*Bases de La Actividad Física y del Rendimiento Deportivo*”. Departamento de Fisioterapia, Universidad de Murcia.

**Carlos Pérez Caballero**

Director de la Sección de Planificación y Control del Entrenamiento.  
Servicio de Actividades Deportivas, Universidad de Murcia.

### **Correspondencia:**

**Luis Sánchez Medina**

e-mail: lsmedina@gmail.com

## RESUMEN

La presente revisión pretende analizar los beneficios que el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) puede aportar al ámbito de las Ciencias del Deporte. Las técnicas de GPS son cada día más precisas, y permiten monitorizar la posición y la velocidad de un atleta segundo a segundo, al aire libre, en prácticamente cualquier tipo de terreno. Los resultados de los estudios llevados a cabo hasta la fecha son prometedores, y destacan el potencial de esta nueva tecnología en su aplicación al mundo de la actividad física y el deporte. Los receptores GPS resultan especialmente interesantes cuando se combina la información que aportan con los datos recogidos por otro tipo de sensores. Recientemente, han aparecido en el mercado algunos dispositivos que integran en un mismo aparato un GPS y un monitor del ritmo cardiaco. Con ellos es posible realizar detallados análisis del rendimiento deportivo, al relacionar la posición, velocidad de desplazamiento o altura a la que se encuentra un deportista con su respuesta fisiológica en cada momento. Esta circunstancia los hace muy útiles en la valoración en campo.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de Posicionamiento Global, ejercicio, actividad física, test de campo, entrenamiento, navegación.

## ABSTRACT

This review aims to analyze the benefits that the Global Positioning System (GPS) offers to Sport Science. GPS techniques allow the monitoring of the position and speed of an athlete in virtually any outdoor location on earth with acceptable precision. The results of the various studies on GPS and physical activity are promising so far. They emphasize the potential of this new technology for the exercise sciences. GPS receivers are especially useful when combined with sensors that provide other bio-measurements. Recently, some devices that integrate a GPS with a heart rate monitor have hit the market. They allow a detailed analysis of sport performance, relating GPS data with the physiological response to exercise, and are thus well suited for sport-specific field testing.

**KEY WORDS:** Global Positioning System, exercise, physical activity, field test, training, navigation.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Hasta hace tan sólo unos pocos años, conocer con precisión la posición, la velocidad de desplazamiento o la altitud a la que un deportista se encontraba en cada momento, ya fuera en tierra, mar o aire, nos podría haber parecido una utopía. Si, además, nos hubieran dicho que, a estos datos, podría añadirse el registro de parámetros fisiológicos como la frecuencia cardiaca, y que el aparato de medición sería de reducido tamaño, perfectamente portátil, y asequible para el bolsillo de, prácticamente, cualquier persona, a buen seguro que hubiésemos deseado disponer de semejante “artilugio”. Hoy día, y gracias al incesante avance tecnológico, este tipo de dispositivos –basados en el *Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*– son ya una realidad.

Durante las últimas décadas, aparatos como el pulsómetro telemétrico, los sistemas portátiles de análisis del intercambio gaseoso, los analizadores de lactato en miniatura, los medidores de potencia para ciclismo, etc. han contribuido en gran medida a mejorar la validez de los tests de campo, permitiendo llevar a cabo estudios que antes estaban restringidos al entorno controlado del laboratorio. Valorar la condición física del deportista o evaluar su rendimiento en el lugar de entrenamiento o competición es algo muy deseable, pues nos acerca a la especificidad propia de cada disciplina. Los dispositivos GPS nos permiten avanzar un paso más en este sentido.

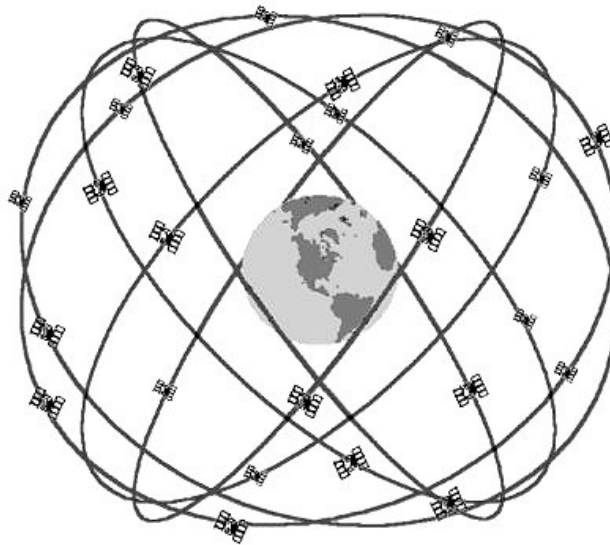
En esta revisión se pretende analizar los beneficios que la tecnología GPS puede aportar al ámbito de las Ciencias del Deporte. Tras repasar brevemente sus fundamentos y modo de funcionamiento, se estudiarán las posibles aplicaciones de este sistema de posicionamiento, sus ventajas e inconvenientes frente a otros sistemas alternativos, así como la validez de sus mediciones. Finalmente, se comentarán las características de algunos dispositivos GPS diseñados específicamente para uso deportivo y que se comercializan desde hace unos meses en nuestro país.

## 2. EL SISTEMA GPS

---

### 2.1 Fundamentos

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS, del inglés *Global Positioning System*) es un sistema de radionavegación vía satélite desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos; y está plenamente operativo desde el mes de julio de 1995. Este sistema emplea una constelación de 24 satélites en órbita alrededor de la Tierra, a 20.200 km de altitud, describiendo 6 órbitas circulares a 55 grados con respecto al plano ecuatorial. Con esta configuración, cada satélite tarda 12 horas en dar una vuelta completa alrededor de nuestro planeta. Los satélites -dedicados a este solo propósito- transmiten continuamente señales de radiofrecuencia con datos de posición y tiempo, y están colocados de tal forma que, normalmente, entre 6 y 8 de ellos son "visibles" desde cualquier punto del globo (Figura 1).



**Figura 1:** Segmento espacial del sistema GPS: una constelación de 24 satélites NAVSTAR orbita la Tierra a 20.200 km de altitud.

En tierra, una red de estaciones de control y antenas, estratégicamente ubicadas en diferentes puntos del planeta, monitoriza el estado de cada satélite, su respectiva posición en órbita y la información que éste emite, actualizando su configuración u, ocasionalmente, corrigiendo errores. Los satélites no pueden comunicarse entre sí, sino sólo con las estaciones de control; una de éstas actúa como estación maestra.

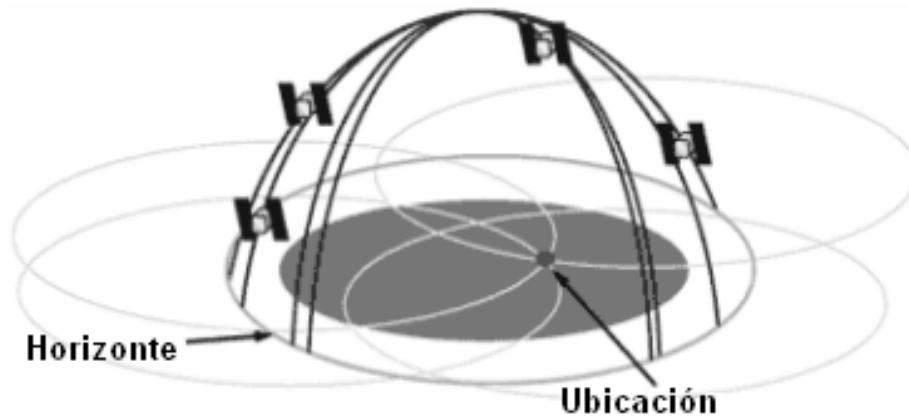
Las señales transmitidas por los satélites pueden ser captadas y decodificadas por cualquiera que disponga de un receptor GPS debidamente configurado, sin coste alguno. Estos dispositivos se han conseguido miniaturizar hasta reducirse a simples circuitos integrados, lo cual ha permitido una drástica reducción en los costes de fabricación, favoreciendo su producción en masa. Paralelamente, el interés del público por esta tecnología se ha multiplicado incesantemente durante la última década. En la actualidad, es común encontrar receptores GPS integrados en todo tipo de vehículos y maquinaria, existiendo centenares de modelos de diferentes marcas. El

transporte, las comunicaciones, la construcción, la agricultura, la investigación científica, e incluso el ocio y la recreación están encontrando un valioso aliado en este sistema global de posicionamiento. Hoy día, las aplicaciones civiles y comerciales superan con mucho a las militares. De forma parecida a lo sucedido con el teléfono móvil, el GPS va camino de convertirse en una utilidad universal.

## 2.2 Modo de funcionamiento

La clave del correcto funcionamiento del sistema GPS reside en una medición del tiempo ultra precisa, y en una monitorización continua de los satélites por parte de las estaciones de control. Cada satélite va equipado con 4 relojes atómicos, capaces de medir el tiempo con una precisión de nanosegundos. Los relojes de todos los satélites están sincronizados entre sí. Cada satélite transmite, constantemente, su posición exacta dentro de su respectiva órbita, junto con la señal de tiempo. Cada señal enviada lleva un "sello" del momento exacto en que se envió, y un código único, pseudo-aleatorio, que identifica al satélite de procedencia.

Los satélites actúan como puntos de referencia para la navegación terrestre. Lo que hace un receptor GPS es detectar, decodificar y procesar las señales que le llegan de los satélites. El cálculo de la distancia a la que nos encontramos de un satélite se determina midiendo el tiempo que la señal de radio tarda en llegar desde dicho satélite a nuestro receptor, y multiplicándolo por la velocidad de la luz. Conocida esta distancia, nuestra posición ha de encontrarse en algún punto de la superficie de una esfera imaginaria centrada en el satélite, y de radio igual a la distancia que nos separa de él. Al medir la distancia a un segundo satélite, reducimos nuestra posición al círculo que resulta de la intersección de las dos esferas imaginarias centradas en sendos satélites. Siguiendo con este procedimiento, y midiendo la distancia que nos separa de tres satélites, podemos "triangular" nuestra posición en cualquier lugar de la Tierra. Una señal adicional, procedente de un cuarto satélite, hará todavía más precisa la determinación de nuestra posición en tres dimensiones (latitud, longitud y altitud) (Figura 2), pues con ella se consigue corregir cualquier error de sincronización entre el reloj atómico de los satélites -extremadamente preciso- y el reloj de cuarzo de los receptores -mucho menos preciso-. Al igual que las estaciones de control corrigen a los satélites; éstos son capaces de corregir a los receptores individuales.



**Figura 2:** Es necesario recibir la señal de un mínimo de 4 satélites para ubicar con precisión nuestra posición en los tres ejes del espacio.

Es deseable, por tanto, contar con un receptor de un mínimo de 4 canales, aunque cuantos más satélites consiga detectar el receptor, mejor será la precisión en sus determinaciones<sup>1</sup>. Hoy día esto ya no es un problema, ya que casi todos los receptores disponibles comercialmente cuentan con 12 o más canales.

A partir de unas medidas precisas de posición y tiempo, la velocidad puede calcularse directamente. No obstante, la mayoría de receptores GPS son capaces de calcular la velocidad de desplazamiento “*on line*”, midiendo la variación en la frecuencia de las señales de radiofrecuencia debida al efecto Doppler<sup>2-4</sup>. Para la realización de estos cálculos, cada fabricante emplea sofisticados algoritmos y filtros propietarios que no suele revelar<sup>2</sup>. La medición de velocidad obtenida a partir del efecto Doppler tiene la ventaja de no verse afectada por las inclinaciones del terreno<sup>3,4</sup>.

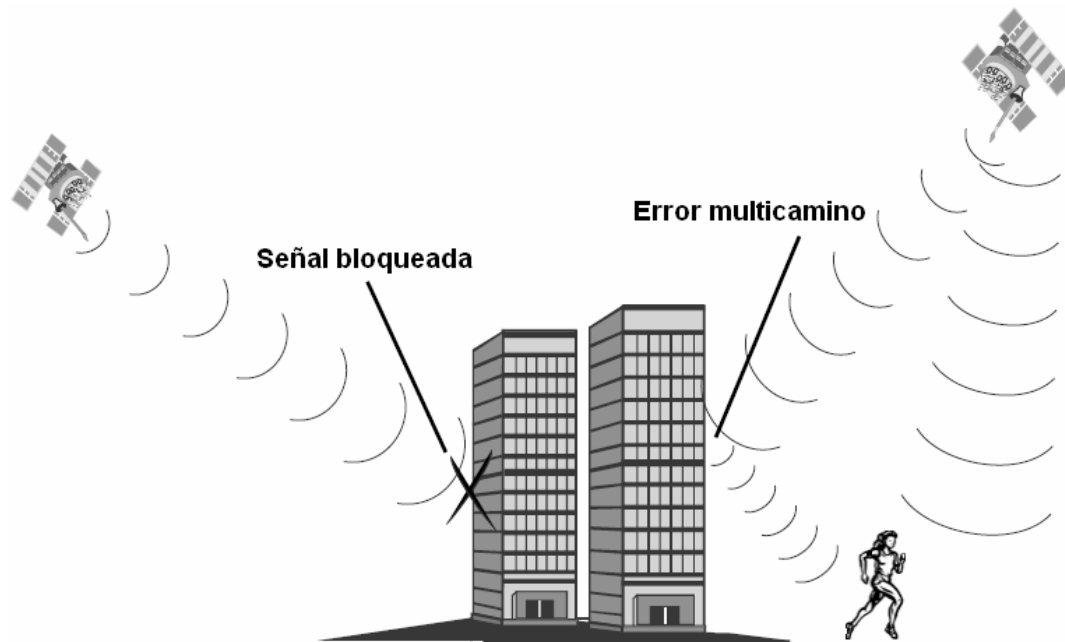
### 2.3 Sistemas mejorados de GPS

Los satélites NAVSTAR transmiten en dos frecuencias: L1 (1575,42 MHz) y L2 (1227,6 MHz), moduladas con dos tipos de códigos. El código C/A (actualmente sólo para L1), que se usa para aplicaciones civiles, fue intencionadamente degradado por el Departamento de Defensa estadounidense hasta mayo del año 2000. Debido a que el sistema GPS fue diseñado originalmente para uso militar, esta “disponibilidad selectiva” (SA, *selective availability*) fue una restricción impuesta con el fin de evitar que fuerzas hostiles pudieran emplear toda la precisión de la tecnología GPS para atacar a EE.UU. o sus aliados. El código P, clasificado y encriptado, está reservado para aplicaciones militares. Estados Unidos se reserva el derecho de, en cualquier momento, volver a imponer la SA en aquellas zonas del planeta donde puedan surgir conflictos que supongan una amenaza para dicho país.

Aún sin la SA, las fuentes de error que afectan a las determinaciones de la posición mediante GPS son varias: ligeras variaciones en las órbitas de los satélites (efemérides), retrasos que experimenta la señal al propagarse por la troposfera e ionosfera, errores de sincronización entre relojes, interferencias y rebotes de la señal al llegar a tierra (error multicamino), visibilidad de los

satélites, dilución geométrica de la posición (GDOP), errores debidos a la calidad o la configuración del propio receptor, etc. El error más importante de todos es la propagación ionosférica. Estos errores se van acumulando y reducen la precisión que podría lograrse; con el fin de corregirlos, se han diseñado diferentes sistemas que mejoran significativamente la precisión obtenida.

La señal GPS no viaja a través de la mayoría de objetos sólidos, tales como edificios o montañas (Figura 3). Por tanto, no funciona en interiores, ni debajo del agua o bajo tierra, aunque sí atraviesa el vidrio o los plásticos. Obviamente, la mejor recepción de la señal GPS se consigue en condiciones de cielo abierto.



**Figura 3:** La reflexión de las señales en superficies próximas al receptor origina retardos en la señal. Es una fuente de error muy difícil de evitar.

Usando un receptor GPS estándar, la precisión habitual cuando la SA estaba activada era de unos 100 m en el plano horizontal y 156 m en el vertical; sin ella, la precisión mejora hasta, aproximadamente, los 15-20 m en el plano horizontal y los ~27 m en el vertical (según informaciones oficiales de la *Interagency GPS Executive Board*). Si se requiere de una mayor resolución en las determinaciones se hace necesario recurrir a algunas formas mejoradas de GPS, como el GPS diferencial (dGPS) o los, más modernos, sistemas de aumento o de corrección diferencial en tiempo real (WAAS en EE.UU., EGNOS en Europa, MSAS en Japón), que permiten lograr precisiones mejores de los 2 m<sup>4</sup>. La mayoría de los nuevos receptores de GPS vienen preparados para poder utilizar uno o más de estos sistemas<sup>5</sup>.

Debido a que el GPS es un sistema en constante evolución, se espera obtener cada vez una mayor precisión en las determinaciones. En un futuro muy próximo, se planea agregar señales adicionales tanto de uso civil como militar. La primera nueva señal va a ser el código C/A en la portadora L2, lo que va a dotar a los receptores de uso civil de dos canales para corregir el error ionosférico. Asimismo, se añadirá una tercera señal civil en la frecuencia L5

(1176,45 MHz), que servirá como señal redundante a la L1<sup>6</sup>. El despliegue de Galileo, el sistema europeo de navegación por satélite, está previsto para 2008. GPS y Galileo serán sistemas compatibles y complementarios, y el uso conjunto de los mismos permitirá lograr mejores precisiones que las conseguidas hasta la fecha, con mayores coberturas de la señal.

El dGPS emplea receptores fijos, terrestres, con el fin de corregir el ruido y/o los errores que intencionadamente puedan afectar a la señal convencional de GPS. Estos receptores permanentes captan la señal de todos los satélites y calculan las pseudo-distancias que les separan de ellos, comparándolas con las distancias verdaderas (conocidas) a las que se encuentran. Combinado con otra información, estas correcciones se transmiten, a unas frecuencias fijas, a los receptores con los que cuenta el usuario final. De esta forma, el receptor GPS puede, continuamente, ir corrigiendo las señales que le llegan de los satélites para calcular la posición con una precisión sustancialmente mayor que la proporcionada por el GPS estándar<sup>2</sup>. Con el dGPS, la precisión en las determinaciones de posición suele ser de  $\pm 1$  m. El principal inconveniente del GPS diferencial es que sólo está disponible si se posee un receptor compatible y, además, se contrata un proveedor específico de este tipo de servicio<sup>3,4</sup>.

### 3. APLICACIONES DEL GPS EN EL DEPORTE

---

La principal aplicación para la cual fue concebido el GPS es, obviamente, la *navegación*. Determinar nuestra posición en cualquier punto de la Tierra, o encontrar el mejor camino para llegar de un punto 'A' a un punto 'B', es ahora mucho más fácil si se cuenta con un receptor GPS. Sin embargo, y en la mayoría de los casos, en el ámbito de la actividad física y el deporte la navegación en sí misma no constituye una aplicación especialmente interesante. ¿En qué medida podemos, pues, beneficiarnos de esta nueva tecnología?

Determinar la velocidad de desplazamiento de un individuo en numerosas situaciones de la vida real es extremadamente importante para los estudios del metabolismo energético de la marcha y la carrera, así como para la valoración del gasto energético diario<sup>7</sup>. Hasta ahora, este tipo de determinaciones eran difíciles de realizar fuera del laboratorio y, caso de llevarse a cabo, se hacían con poca precisión<sup>2</sup>. Dispositivos como el podómetro o los acelerómetros han sido frecuentemente empleados con este propósito<sup>8-13</sup>. Aunque son útiles para obtener índices globales del grado de actividad física realizada por una persona<sup>9,10</sup>, ambos requieren una calibración cuidadosa (pues son muy sensibles a ligeras modificaciones en el estilo de caminar o correr) y no son apropiados para su uso en la mayoría de disciplinas deportivas en situaciones de entrenamiento y competición<sup>14</sup>.

En el campo de la fisiología y del rendimiento deportivo, es bien conocido que parámetros como la velocidad de desplazamiento y la pendiente o inclinación tienen una profunda influencia en la respuesta fisiológica al ejercicio. En la carrera de resistencia, la velocidad está directamente relacionada con el consumo de oxígeno y la economía de esfuerzo<sup>15,16</sup>. Desde el punto de vista biomecánico, la estimación de la velocidad es útil para el cálculo de la energía cinética requerida para mover el cuerpo ( $1/2 m \cdot v^2$ ), así como el momento lineal ( $m \cdot v$ ). Una estimación precisa de la velocidad es también útil para estudios de resistencia aerodinámica<sup>2</sup>.

La tecnología GPS permite una monitorización constante de la posición, la velocidad de desplazamiento y la altitud a la que se encuentra un deportista. Ser capaces de registrar estas variables continuamente, al aire libre, en el propio entorno de entrenamiento, y en cualquier tipo de terreno es, sin lugar a dudas, una gran ventaja.

Son varias las investigaciones llevadas a cabo en los últimos años con el propósito de comprobar la validez del sistema GPS en su aplicación a diferentes deportes o a la realización de actividad física<sup>1-6,17-18</sup>. Todas ellas muestran resultados muy satisfactorios.

En un primer estudio, realizado antes de la eliminación de la SA, Schutz y Chambaz<sup>17</sup> estudiaron la utilidad del sistema GPS estándar para evaluar la velocidad de la marcha, la carrera y el ciclismo. La estimación de la velocidad tuvo un error de  $\pm 1,1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  al caminar,  $\pm 0,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  al correr y  $\pm 0,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  al pedalear en bicicleta. La correlación entre las distintas velocidades medidas con GPS y determinadas por cronometraje manual fue muy alta ( $r = 0,99$ ;  $p < 0,0001$ ).

Más adelante, Schutz y Herren<sup>2</sup> analizaron la precisión del dGPS para determinar la velocidad de carrera, encontrando que permite una precisa estimación de la velocidad en un rango de velocidades comprendido entre 2,9 y 25,2 km·h<sup>-1</sup>. El error estándar de la predicción fue tan sólo de 0,1 km·h<sup>-1</sup>, siendo independiente de la magnitud de la velocidad. Dichos autores comprobaron cómo la precisión del sistema diferencial de GPS mejora en un factor de 8-10 veces la del GPS estándar, llegando a la conclusión de que el dGPS es claramente suficiente para cualquier aplicación práctica en el campo de la fisiología y la medicina del deporte.

Witte y Wilson<sup>1</sup> investigaron la precisión en las determinaciones de velocidad cuando se emplea un GPS estándar (no diferencial). Para ello compararon, en distintas condiciones (cantidad y geometría de los satélites detectados, y tipo de recorrido: recto o circular), los valores de la velocidad medidos durante el ciclismo a distintas velocidades. Este estudio demostró que los errores en la velocidad se incrementan cuando disminuye el número de satélites; y que el error cometido en recorridos circulares de pequeño radio es mayor que en recorridos de mayor radio, o en itinerarios rectilíneos. Pese a la existencia de errores, se considera que el GPS estándar es capaz de determinar la velocidad con una precisión que oscila entre 0,2 y 0,4 m·s<sup>-1</sup> en la mayoría de los casos.

Usando un receptor dGPS combinado con un analizador de gases, Larsson y Henriksson<sup>3</sup> llevaron a cabo un experimento para ver si era posible relacionar las variables fisiológicas medidas en un test de carrera de orientación en campo con los datos de posición y velocidad aportados por el GPS. Gracias al GPS, fue posible realizar un análisis detallado de la velocidad de carrera en diferentes tramos del recorrido, así como relacionar las mediciones metabólicas con la localización del sujeto en cada momento. Los errores medios en la distancia y la posición fueron de 0,04-0,70% y 1,94-2,13 m, respectivamente; valores que pueden considerarse como muy buenos. Los investigadores sugieren que la medición de la velocidad por medio de este sistema es la única manera que existe en la actualidad para determinar con precisión la velocidad en carreras de orientación que se desarrollan en plena naturaleza.

Terrier et al.<sup>18</sup> emplearon un sistema avanzado de dGPS (posicionamiento diferencial por portadores de fase) para estudiar la biomecánica de la marcha humana fuera del laboratorio, sin ningún tipo de restricción del movimiento. Dicho sistema es capaz de determinar la posición con una precisión inferior a 1 cm. Las mediciones obtenidas con un dGPS profesional se compararon con las aceleraciones corporales registradas por un acelerómetro triaxial. Los resultados obtenidos en las mediciones de la frecuencia y longitud de zancada, así como en la velocidad al caminar, fueron satisfactorios. Aunque este sistema es extremadamente preciso, los dispositivos necesarios (incluida una antena) son todavía demasiado aparatosos (más de 4 kg de equipo) y poco prácticos para su uso rutinario en la valoración del deportista. En un trabajo similar, Terrier y Schutz<sup>6</sup> volvieron a comprobar cómo el GPS de alta precisión es una buena alternativa al método clásico de análisis de la marcha humana en laboratorio.

Un reciente estudio<sup>5</sup> ha examinado la precisión que los nuevos sistemas de GPS, en concreto el WAAS (*Wide Angle Augmentation System*), tienen para

determinar la posición y la velocidad. Se ha podido comprobar cómo la precisión del WAAS es considerablemente superior al GPS estándar, y directamente comparable a la del dGPS tradicional. Esta circunstancia hace que el típico sistema dGPS pueda considerarse ya obsoleto, siendo preferible usar ahora estas nuevas tecnologías mejoradas de GPS (WAAS, EGNOS, etc.) para su uso en las investigaciones y análisis que se lleven a cabo en el ámbito de las Ciencias del Deporte<sup>5</sup>.

#### 4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL GPS

---

Las ventajas del GPS parecen claras: un dispositivo pequeño, ligero y autónomo nos proporciona posición 3-D, velocidad de desplazamiento y tiempo precisos, de forma continua, y sin importar el tipo de terreno en que nos encontremos; los datos pueden visualizarse en tiempo real y/o registrarse para su posterior análisis.

La principal limitación es que las mediciones sólo pueden llevarse a cabo al aire libre, en un entorno en el que la señal de los satélites no se vea obstruida por edificios altos, túneles, zonas de arbolado compacto, etc. Además, en condiciones de cielo muy nublado o cubierto la recepción de la señal puede no ser buena.

Aunque, en principio, un receptor GPS ha de permitirnos conocer nuestra posición en cualquier momento y lugar del planeta, el número y la disposición geométrica de unos satélites con respecto a otros afecta a la calidad de la "triangulación". La situación óptima se producirá cuando tengamos un satélite justamente encima de nosotros y el resto igualmente espaciados por el horizonte<sup>1</sup>. Pese a estas circunstancias, los receptores GPS son cada vez más sensibles y sofisticados, y proporcionan mejor cobertura, incluso en condiciones no ideales.

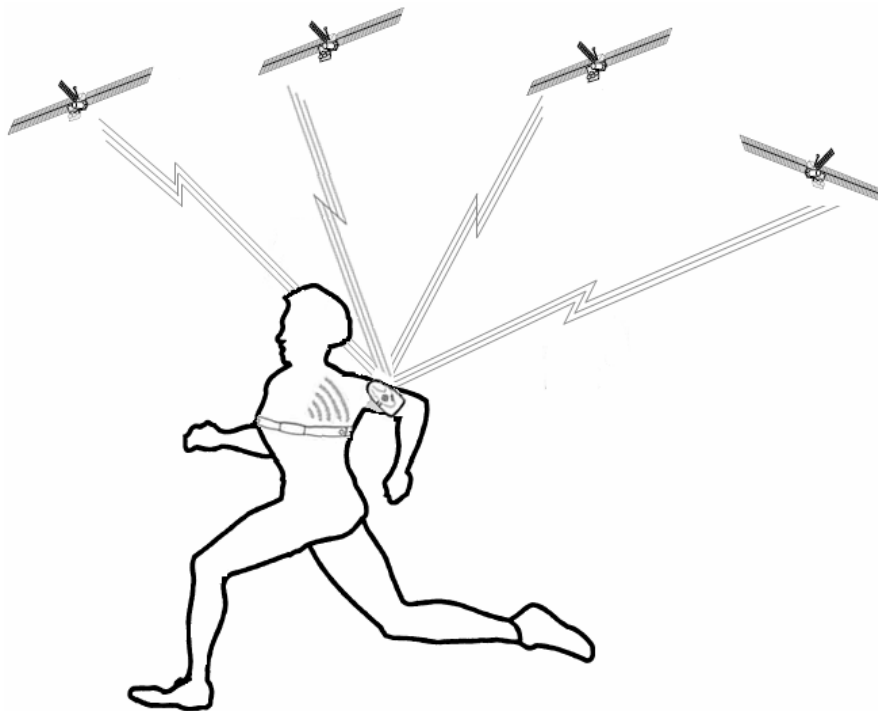
Para su aplicación deportiva, es conveniente saber que las mediciones del GPS son especialmente precisas cuando se realizan itinerarios lineales donde la dirección se mantiene constante durante un mínimo de tiempo (al menos varios segundos). Sin embargo, para recorridos curvilíneos de pequeño radio, o cuando se producen cambios repentinos de velocidad, dirección y/o sentido (algo habitual en los deportes de equipo) la validez del sistema es considerablemente menor<sup>1</sup>.

## 5. GPS Y MONITOR DEL RITMO CARDIACO INTEGRADOS

Aunque muy útil y cada día más preciso, el GPS no es perfecto y tiene sus limitaciones. De hecho, lo que adquiere cada vez más importancia no es el sistema en sí, sino las innumerables aplicaciones a que puede destinarse.

La integración de las mediciones GPS con datos procedentes de diferentes sensores portátiles es algo lógico, y no ha tardado en llegar. La combinación de un receptor GPS con sensores meteorológicos (termómetro, barómetro, ...); biomédicos (pulsómetro, analizador de gases, ...); o mecánicos (acelerómetro, inclinómetro, giroscopio, etc.) aparece como el siguiente paso en el análisis del rendimiento humano.

Desde su introducción a principios de la década de los ochenta, el pulsómetro telemétrico se ha convertido en la principal herramienta para medir la intensidad del esfuerzo físico<sup>19, 20</sup>. Hoy día es usado por millones de personas en todo el mundo, desde el corredor ocasional hasta el médico del deporte. Su fiabilidad y facilidad de uso han contribuido a su éxito<sup>21</sup>.



**Figura 4:** Los receptores de GPS con pulsómetro integrado son ya una realidad.

En los últimos meses, diferentes marcas comerciales han lanzado al mercado modelos de GPS específicamente diseñados para su uso deportivo. Algunos fabricantes han ido un poco más allá, combinando en una misma unidad, un pulsómetro con un receptor GPS (Figura 4). Esta integración de dispositivos era algo deseable; y será un fenómeno cada vez más frecuente en todos los campos de la ciencia y la tecnología<sup>22</sup>.

En esta línea, Schutz y Herren<sup>2</sup> apuntaban hace unos años la utilidad que tendría poder combinar el registro de la frecuencia cardíaca (FC) con la posición y/o la velocidad de un deportista en pleno esfuerzo. Algunos autores<sup>23</sup> habían contemplado ya la posibilidad de combinar la monitorización del ritmo cardíaco con sensores de movimiento, con la intención de medir el gasto energético en estudios de campo.

El uso de receptores GPS es especialmente interesante en aquellas especialidades deportivas en las que, tradicionalmente, ha sido difícil obtener medidas objetivas y fiables del rendimiento. Gracias al GPS, disciplinas como el esquí, la carrera de orientación, el remo y el piragüismo en aguas abiertas, el *windsurfing*, el parapente, el paracaidismo, el montañismo, etc. pueden ahora recibir datos de posición, velocidad, y altitud cada segundo. Si, además, tenemos la posibilidad de relacionar estos datos con la respuesta fisiológica del deportista, el tipo de material empleado o las condiciones meteorológicas, nuestro conocimiento de todos los factores implicados en el rendimiento será, sin duda, cada día mejor.

Contando con la tecnología GPS, pueden diseñarse tests de campo, específicos, más válidos que los realizados hasta el momento. Para los tests realizados en un entorno "semicontrolado" (como puede ser una pista de atletismo o un circuito), el uso del GPS aporta un interesante valor añadido.

Nuestro grupo de trabajo, integrado en la Sección de Planificación y Control del Entrenamiento del Servicio de Actividades Deportivas de la Universidad de Murcia, lleva varios meses experimentando con distintos tipos de receptores GPS en la realización de pruebas de campo (en ciclismo y atletismo, fundamentalmente).

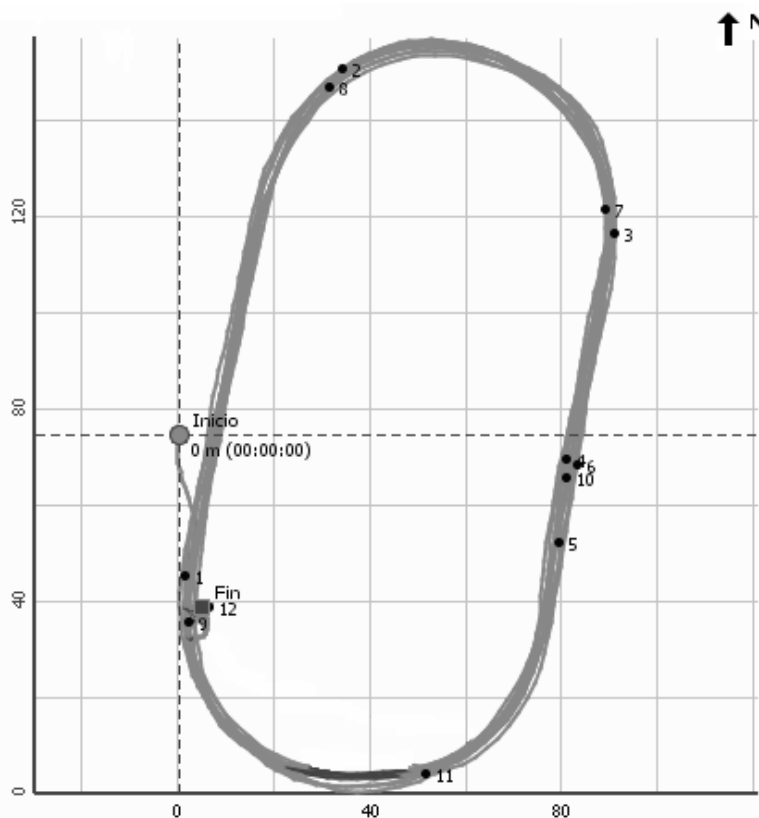
A modo de ejemplo, en la Figura 5 puede observarse el recorrido realizado por un corredor en un test para la determinación de la velocidad aeróbica máxima (test en pista de la Universidad de Montreal<sup>24</sup>). En la Figura 6 se muestran los datos de velocidad y FC registrados por el receptor de GPS.

Entre los principales fabricantes de receptores GPS que actualmente disponen de un monitor del ritmo cardíaco integrado se pueden citar: Garmin (modelo *Forerunner 301*), Timex (*BodyLink System*) y FRWD (modelos *0200*, *0400*, *F300* y *F500*). Todos estos dispositivos son ligeros, de tamaño reducido y se alimentan mediante pilas o baterías recargables.

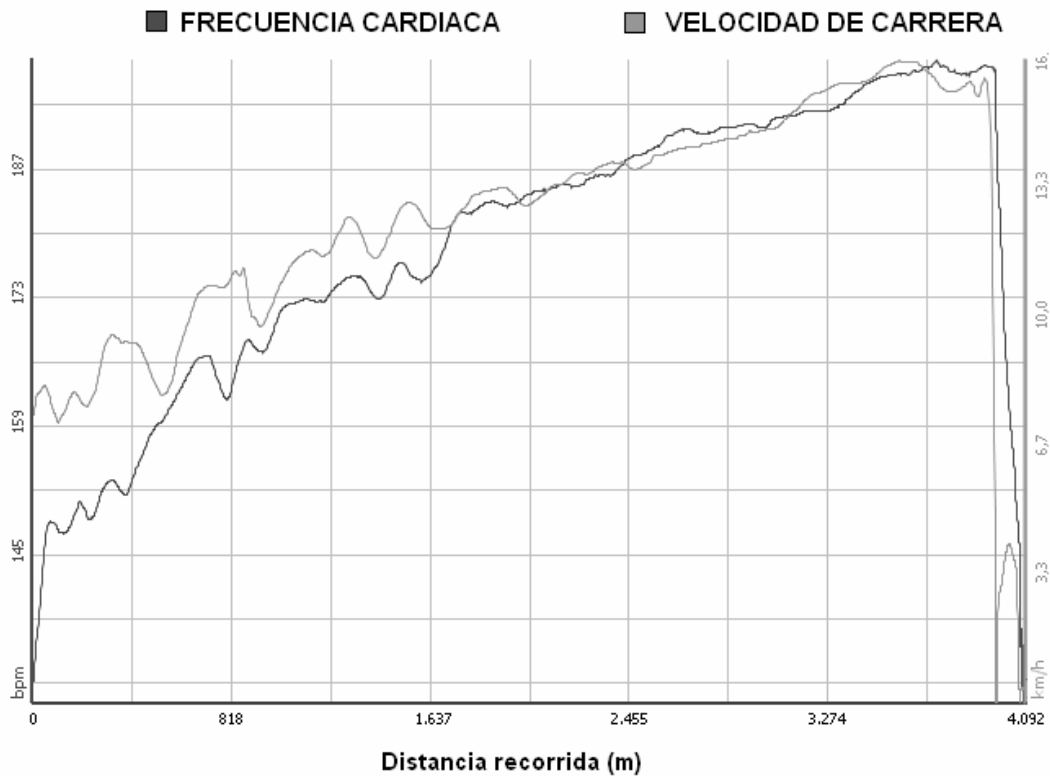
De estos sistemas, tan solo el finlandés FRWD cumple con la mayoría de los requisitos que, según Larsson<sup>4</sup>, ha de cumplir un receptor GPS que pretenda usarse para la investigación en Ciencias del Deporte. Por este motivo, nos parece conveniente destacar, brevemente, las características de este equipo.

El FRWD puede considerarse el primer analizador integrado del rendimiento deportivo, ya que, además del receptor GPS, lleva incorporados un termómetro, un barómetro y un monitor del ritmo cardíaco; todo dentro de un dispositivo de tamaño similar al de un teléfono móvil. El receptor de GPS, de 12 canales, emplea sofisticados algoritmos para proporcionar datos muy precisos de posición y velocidad (3 m para la posición el 90% del tiempo; mejor de 0,2 m·s<sup>-1</sup> para la velocidad el 50% del tiempo; y mejor del 1% en la distancia recorrida, según especificaciones del fabricante). El pulsómetro es compatible

con los principales transmisores de FC del mercado (no codificados) y el registro de datos se puede configurar en intervalos de grabación de 1, 2, 3, 4 ó 5 segundos, soportando también el modo R-R (modelo F500). Grabando a intervalos de tan sólo 1 s, se pueden registrar los datos de 3,5 horas de ejercicio; con intervalos de 5 s se llega a las 18 horas. El sistema funciona con dos pilas recargables que le dotan de gran autonomía y se maneja con tan solo un botón. Los datos registrados quedan almacenados en una memoria interna para su posterior descarga al ordenador. El FRWD viene acompañado de un potente software que facilita la realización de detallados análisis y comparaciones; permite, asimismo, ver los recorridos realizados en 2-D o 3-D y solapar mapas reales a los mismos. Otra interesante característica es que se pueden exportar fácilmente todos los datos registrados a una hoja de cálculo *Excel*. El FRWD es resistente al agua y a los golpes, y se transporta cómodamente fijándolo al brazo por medio de un brazalete o mediante un arnés que se coloca en la espalda.



**Figura 5:** Recorrido en 2-D obtenido mediante un dispositivo GPS (FRWD 0400) durante un test de carrera en pista de atletismo. Los puntos con números corresponden a los tiempos parciales registrados por el atleta.



**Figura 6:** Datos de FC y velocidad de carrera proporcionados por el GPS para el mismo test correspondiente a la Figura 4. El dispositivo de grabación se configuró para que registrase los datos a intervalos de 1 s.

Otra ventaja con la que cuenta este dispositivo es que emplea un sistema dual para determinar la altitud. Por medio del receptor GPS obtiene la altitud de partida para, después, registrar las diferentes alturas alcanzadas durante el ejercicio mediante su barómetro integrado, muy sensible a pequeños cambios en la presión atmosférica.

Este punto es importante, pues los datos de altimetría han sido siempre el punto más débil del sistema GPS, siendo los errores en el eje vertical siempre mayores que los horizontales con esta tecnología<sup>4,22</sup>. Ladetto et al.<sup>22</sup> apuntaban ya hace unos años la utilidad de combinar los datos del GPS con los de un barómetro de precisión.

## 6. CONCLUSIÓN

---

Los estudios llevados a cabo hasta la fecha demuestran que el sistema GPS proporciona unas medidas lo suficientemente precisas como para poder ser empleado en la investigación en medicina del deporte, o la evaluación cotidiana del deportista sobre el propio terreno de entrenamiento o competición. Combinando un receptor GPS con un pulsómetro u otros sensores biomédicos, es posible realizar un pormenorizado análisis de la ruta descrita por un deportista, su velocidad, posición y altitud, y relacionar estas variables con la respuesta fisiológica en cada momento. La incorporación de este tipo de dispositivos al ámbito de las Ciencias del Deporte permitirá mejorar la validez de los tests realizados sobre el propio terreno deportivo, al dotarnos de un mayor control sobre el esfuerzo realizado y de medidas más fiables y objetivas que las obtenidas hasta ahora.

## BIBLIOGRAFÍA

---

1. **Witte TH, Wilson AM.** Accuracy of non-differential GPS for the determination of speed over ground. *J Biomech* 2004; 37: 1891-1898.
2. **Schutz Y, Herren R.** Assessment of speed of human locomotion using a differential satellite global positioning system. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 642-646.
3. **Larsson P, Henriksson-Larsén K.** The use of dGPS and simultaneous metabolic measurements during orienteering. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 1919-1924.
4. **Larsson P.** Global Positioning System and sport-specific testing. *Sports Med* 2003; 33: 1093-1101.
5. **Witte TH, Wilson AM.** Accuracy of WAAS-enabled GPS for the determination of position and speed over ground. *J Biomech* 2005; 38: 1717-1722.
6. **Terrier P, Schutz Y.** Variability of gait patterns during unconstrained walking assessed by satellite positioning (GPS). *Eur J Appl Physiol* 2003; 90: 554-561.
7. **Schutz Y, Deurenberg P.** Energy metabolism: overview of recent methods used in human studies. *Ann Nutr Metab* 1996; 40: 183-193.
8. **Schutz Y, Weinsier RL, Hunter GR.** Assessment of free-living physical activity in humans: an overview of currently available and proposed new measures. *Obes Res* 2001; 9: 368-379.
9. **Tudor-Locke C, Williams JE, Reis JP, Pluto D.** Utility of pedometers for assessing physical activity. Convergent validity. *Sports Med* 2002; 32: 795-808.
10. **Tudor-Locke C, Williams JE, Reis JP, Pluto D.** Utility of pedometers for assessing physical activity. Construct validity. *Sports Med* 2004; 34: 281-291.
11. **Tharion WJ, Yokota M, Buller MJ, DeLany JP, Hoyt RW.** Total energy expenditure estimated using a foot-contact pedometer. *Med Sci Monit* 2004; 10: CR504-509.
12. **Le Bris R, Girard O, Millet GP, Auvinet B, Barrey E.** Relations entre la consommation d'oxygène et des mesures accélérométriques en course à pied sur piste. *Science & Sports* 2005; 20: 91-94
13. **Ekelund U, Yngve A, Brage S, Westerterp K, Sjostrom M.** Body movement and physical activity energy expenditure in children and adolescents: how to adjust for differences in body size and age. *Am J Clin Nutr* 2004; 79: 851-856.
14. **Schneider PL, Crouter SE, Lukajic O, Bassett DR.** Accuracy and reliability of 10 pedometers for measuring steps over a 400-m walks. *Med Sci Sports Exerc* 2003; 35: 1779-1784.
15. **Di Prampero PE, Atchou G, Brueckner JC, Moia C.** The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol* 1986; 55: 259-266.

16. **Di Prampero PE.** Factors limiting maximal performance in humans. *Eur J Appl Physiol* 2003; 90: 420-429.
17. **Schutz Y, Chambaz A.** Could a satellite-based navigation system (GPS) be used to assess the physical activity of individuals on earth? *Eur J Clin Nutr* 1997; 51: 338-339.
18. **Terrier P, Ladetto Q, Merminod B, Schutz Y.** High-precision satellite positioning system as a new tool to study the biomechanics of human locomotion. *J Biomech* 2000; 33: 1717-1722.
19. **Achten J, Jeukendrup AE.** Heart rate monitoring. Applications and limitations. *Sports Med* 2003; 33: 517-538.
20. **Laukkanen RMT, Virtanen PK.** Heart rate monitors: state of the art. *J Sport Sci* 1998; 16: S3-S7.
21. **Noakes TD, Lambert MI, Gleeson M.** Heart rate monitoring and exercise: challenges for the future. *J Sport Sci* 1998; 16: S105-S106.
22. **Ladetto Q, Merminod B, Terrier P, Schutz Y.** On foot navigation: when GPS alone is not enough. Actas de la Conferencia de Navegación Europea (GNSS), Génova, Italia 1999; pp. 443-449. Disponible en [http://topo.epfl.ch/publications/gnss99\\_ql.pdf](http://topo.epfl.ch/publications/gnss99_ql.pdf)
23. **Rennie K, Rowsell T, Jebb SA, Holburn D, Wareham NJ.** A combined heart rate and movement sensor: proof of concept and preliminary testing study. *Eur J Clin Nutr* 2000; 54: 409-414.
24. **Leger L, Boucher R.** A indirect continuous running multistage field test: The Université de Montréal Track Test. *Can J Appl Sport Sci* 1980; 5:77-84.