

# **CARACTERIZACIÓN DE LA MOVILIDAD DE CORREDORES EN MARATONES**

**David Llopis Castelló**

Profesor Ayudante Doctor, Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras, Universitat Politècnica de València

**Alfredo García García**

Catedrático, Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras, Universitat Politècnica de València

## **RESUMEN**

En la última década se ha producido un incremento significativo de las personas que practican el “running” como deporte principal para mejorar su calidad de vida. Este hecho ha producido un aumento de la celebración de carreras populares, entre las que cabe destacar la maratón por el volumen de personas que concentra. Para evitar aglomeraciones y que la carrera se celebre bajo condiciones de flujo libre, las organizaciones separan a los corredores en olas y cajones de manera que los corredores son lanzados con un desfase de tiempo determinado. Sin embargo, el número de estudios sobre el comportamiento de los corredores a lo largo de la carrera es escaso.

Así, el objetivo principal de esta investigación fue caracterizar la movilidad de los corredores desde el punto de vista de su operación, analizando el ritmo de cada uno de ellos de manera individual y grupal. Para ello, se realizó un análisis macroscópico y microscópico de los corredores que participaron en las maratones de Valencia entre 2016 y 2019.

Todo ello permitió caracterizar el comportamiento de los corredores que pertenecían a la misma ola. Como resultado, la variación del ritmo a lo largo de la carrera es mayor a medida que el ritmo promedio de la carrera aumenta. Además, mientras que la descarga de corredores en la primera ola presentaba intensidades muy elevadas durante los primeros minutos, en el resto de las olas se observó una descarga más homogénea y tendida.

Finalmente, se identificó que tanto la intensidad, expresada en número de corredores por unidad de tiempo, como la densidad, expresada en número de corredores por unidad de longitud, alcanzaban sus valores máximos en la primera parte de la carrera, indicando que la zona con mayor interacción entre corredores se produce en los primeros 5-10 kilómetros de la carrera.

Estos resultados pueden sentar la base para la definición de modelos de simulación para una organización más eficiente y segura de este tipo de eventos, principalmente cuando existan medidas excepcionales como las establecidas por la pandemia de la COVID-19.

## 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que a partir del año 2016 se observa un decaimiento de la participación global en carreras, los maratones siguen aglutinando un mayor número de corredores con el paso de los años registrando una tasa de crecimiento anual ligeramente menor al 2% (RunRepeat y IAU, 2019). Los motivos para participar en este tipo de carreras están cambiando y son muy diversos. A principios de siglo, la mayoría de los corredores buscaban batir sus propios registros, mientras que hoy en día predominan los motivos relacionados con la fisiología, la salud y la sociedad. Este hecho ha producido una mayor movilidad por parte de las personas que se desplazan para correr, un incremento de los tiempos de finalización de la carrera y una menor proporción de participantes con edades comprendidas entre los 30 y los 50 años (RunRepeat y IAU, 2019).

El aumento de la participación en este tipo de carreteras ha generado que la salida se estructure en lo que comúnmente se conoce como *olas* y, a su vez, estas en *cajones* (Treiber, 2014). Cada *ola* y *cajón* tiene asociado un tiempo objetivo, es decir, el tiempo en que un corredor considera que finalizará la carrera. Con el fin de minimizar las interacciones entre corredores y garantizar que la carrera se produzca en flujo libre – ningún corredor ve afectado su ritmo por la afección de otro –, algunos organizadores solicitan a los participantes, en el momento de inscribirse en la carrera, prueba de que puede lograr ese tiempo objetivo – habitualmente a partir de resultados de carreras anteriores –. Sin embargo, la influencia de la estructura de la salida no ha sido todavía estudiada, principalmente porque cada organizador lo hace de manera particular para el evento que organiza y la comparación de los resultados obtenidos es compleja al depender de otros factores clave como, por ejemplo, el ancho de la sección. En este sentido, cuanto mayor es el ancho, mayor puede ser la intensidad de descarga de corredores por unidad de tiempo.

En los últimos años se han desarrollado varias investigaciones con el fin de modelizar la evolución del ritmo de los corredores a lo largo de la carrera (Rodríguez et al., 2014; Kwong y Nadarajah, 2019; Lin y Meng, 2018). Estas se desarrollaron en base a los resultados de los maratones de Nueva York, Chicago, Berlín, Londres y Boston, en distintas ediciones. Las distribuciones globales de velocidad – considerando todos los corredores en cada carrera – siguen, en general, una distribución log-normal (Lin y Meng, 2018). En este sentido, se identificó que las distribuciones de velocidad de los grupos de edad más rápido tenían la misma forma – distribución log-normal – que el resto de los finalistas. Mientras que Kwong y Nadarajah (2019) observaron mayores variaciones del ritmo cuanto más lento era un corredor y con el avance de la carrera, Lin y Meng (2018) identificaron mayores variaciones de ritmo individual en los primeros 5 kilómetros de la carrera y a partir del kilómetro 30. En el resto de longitud – desde 5k hasta 30k – el ritmo se mantenía relativamente constante (Lin y Meng, 2018).

Por su parte, Rodriguez et al. (2014) modelizó la dinámica del pelotón del maratón a través de una ecuación diferencial parcial de convección-difusión con velocidad media dependiente de la posición y coeficiente de difusión. De esta forma, se concluyó que la velocidad media del pelotón disminuye mientras que el coeficiente de difusión aumenta con la distancia. Esto significa que la intensidad y densidad de corredores se diluye a lo largo del recorrido.

Adicionalmente, Treiber (2014) analizó las distribuciones de tiempos finales por categorías – edad y sexo – en medias maratonés. En este caso, se observó que, en ausencia de perturbaciones importantes, la distribución de la velocidad dentro de cada grupo es casi gaussiana. Particularmente, solo se observaron desviaciones significativas en: (i) grupos de élite pequeños por efecto pelotón; y (ii) colas de baja velocidad, que producían distribuciones más amplias.

Como conclusión, el estado actual del conocimiento en cuanto a los patrones de comportamiento de los distintos grupos o categorías que conforman un maratón es escaso, pues las investigaciones presentadas anteriormente se centran principalmente en el análisis del ritmo global de la carrera o para categorías muy específicas. Además, todavía cobra mayor importancia la caracterización de los factores más importantes en el desarrollo de maratonés a partir de las medidas de seguridad establecidas por la pandemia de la COVID-19, puesto que la distancia social supone una restricción a tener en cuenta a la hora de diseñar el trazado de la carrera.

## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

El objetivo principal de esta investigación es el análisis descriptivo y cuantitativo de aquellos factores que permiten caracterizar el comportamiento de maratonés.

Concretamente, las principales variables exploradas en este estudio están estrechamente ligadas al ritmo de los corredores, el cual ha sido analizado tanto de manera agregada como desagregada, la intensidad de corredores, entendida como la cantidad de corredores que atraviesan una sección por unidad de tiempo, y la densidad de corredores, expresada en términos de número de corredores por unidad de longitud. Todas estas variables se examinan teniendo en cuenta la configuración inicial o de salida de este tipo de pruebas, habitualmente estructurada en olas.

Las hipótesis más importantes del estudio son: (i) la distribución general de ritmos presenta una asimetría positiva debido a la baja proporción de corredores con condiciones de mantener ritmos de carrera muy bajos y una cola situada en la zona de ritmos altos debido a la dispersión existente de las condiciones físicas de corredores amateur; (ii) la intensidad de descarga de corredores en la salida disminuye a lo largo del tiempo y, además, también lo hace de una a otra ola; (iii) la variación del ritmo a lo largo de la carrera incrementa conforme lo hace el ritmo medio de la carrera, es decir, los corredores más rápidos tienen mayor

facilidad para mantener un ritmo constante a lo largo de la carrera; y (iv) las intensidades y densidades más elevadas se producen en la parte inicial de la carrera debido a la mayor interacción entre corredores.

### 3. MÉTODO Y MATERIALES

Para llevar a cabo el presente trabajo se procedió según el diagrama de flujo de la Figura 1.

En primer lugar, se realizó una descarga masiva de los resultados de los maratones celebrados en la ciudad de Valencia desde 2016 hasta 2019, ambos inclusive. Los resultados de estas carreras están disponibles de manera gratuita a través de la página web del maratón (<https://www.valenciaciudaddelrunning.com/maraton/maraton/>). No obstante, no existe la posibilidad de descargar los datos de manera directa – p.ej., en formato csv – a través de dicho repositorio web. Por ello, se programó un script de *web scraping* mediante lenguaje de programación Python. Este proceso trata usar *bots* para extraer contenido y datos de un sitio web mediante el acceso a su código *HTML* y, a partir de este, obtener los datos almacenados en la base de datos.

Adicionalmente, también se descargaron los datos de los resultados de la página web que aloja los vídeos de la carrera (<https://corriendovoy.com>) con el fin de obtener información extra de los corredores como, por ejemplo, el tiempo de desfase en la salida con respecto al origen de tiempos general. Este tiempo, como se verá posteriormente en el análisis, es clave para determinar en que *Ola* salió cada uno de los participantes.



**Fig. 1 – Diagrama de flujo de la investigación**

La Tabla 1 indica los datos obtenidos de cada uno de los participantes de los maratones de Valencia celebrados de 2016 a 2019. Estos han sido agrupados en tres categorías de datos: (i) general; (ii) salida; (iii) puntos de paso. Los datos que se integran en la categoría “general” han sido empleados principalmente para caracterizar de manera global las carreras celebradas.

En este sentido, posteriormente se analiza la distribución de corredores según el ritmo promedio de estos y se evalúa la evolución de la participación de hombres y mujeres de manera desagregada – por categoría – y agregada – total por sexos –.

Los datos de la categoría “Salida” hacen referencia al *desfase*, que se define como la diferencia entre el tiempo oficial de la prueba – comenzando a contar desde que se da la salida de la primera ola – y el tiempo real del corredor – desde que cruza la salida hasta que llega a meta –. Principalmente, este tiempo permitió identificar a qué *ola* pertenece cada corredor y analizar la descarga de corredores en la salida.

Finalmente, los datos correspondientes a la categoría “puntos de paso” proporcionaron información sobre el tiempo de paso real de cada corredor en los puntos de control de la carrera. Estos datos fueron empleados para analizar la evolución del ritmo de cada corredor y cuantificar la intensidad de corredores en cada uno de estos pasos y la densidad de corredores entre los mismos.

Categoría de datos	Variable
<b>General</b>	Posición
	Dorsal
	Categoría
	Nombre y apellidos
	Tiempo oficial
	Tiempo real
<b>Salida</b>	Desfase
<b>Puntos de paso</b>	Tiempo en: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5k</li> <li>• 10k</li> <li>• 15k</li> <li>• 21,097 (media maratón)</li> <li>• 25k</li> <li>• 30k</li> <li>• 35k</li> <li>• 40k</li> <li>• 42,195 (meta)</li> </ul>

**Tabla 1 – Resumen de datos obtenidos por corredor**

Cabe destacar que una vez descargados los datos se realizó una reducción de los mismos con el fin de eliminar cualquier dato anómalo o incompleto. Para ello, al disponer de diferentes fuentes de datos – clasificación general y datos individuales –, se cruzaron los tiempos reales de cada corredor haciendo una búsqueda por su nombre. Se decidió utilizar el nombre del corredor para este proceso debido a las inconsistencias detectadas en las variables *dorsal* y *posición*.

## 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

El análisis que se presenta a continuación se ha dividido en cuatro bloques principales, yendo desde aspectos más generales a más particulares: (i) caracterización general; (ii) análisis de la salida; (iii) análisis de ritmo; y (iv) análisis espacio-temporal. Mientras que el primero de los bloques presenta datos de todos los maratones disponibles (2016-2019), los bloques siguientes se centran exclusivamente en los datos del maratón del año 2019. En este sentido, las tendencias que muestran los años anteriores (2016-2018) son similares al año que se presenta.

### 4.1 Caracterización general

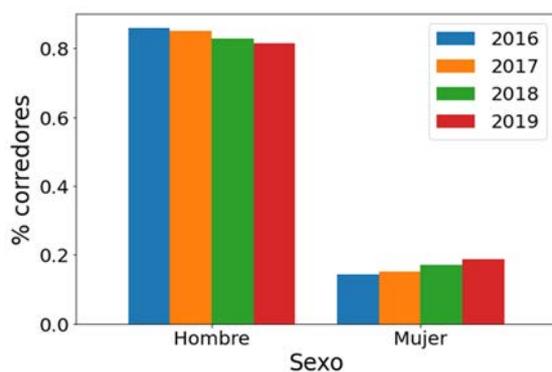
Esta sección se centra en el análisis de los participantes por categoría, la evolución de la participación de hombres y mujeres a lo largo de los años y la distribución de corredores según su ritmo medio.

La Figura 2 muestra el tanto por ciento de hombres y mujeres que participaron en las ediciones del maratón de Valencia entre 2016 y 2019. A pesar de la baja participación de las mujeres en este tipo de pruebas (< 20%), se puede apreciar que año tras año su presencia es mayor.

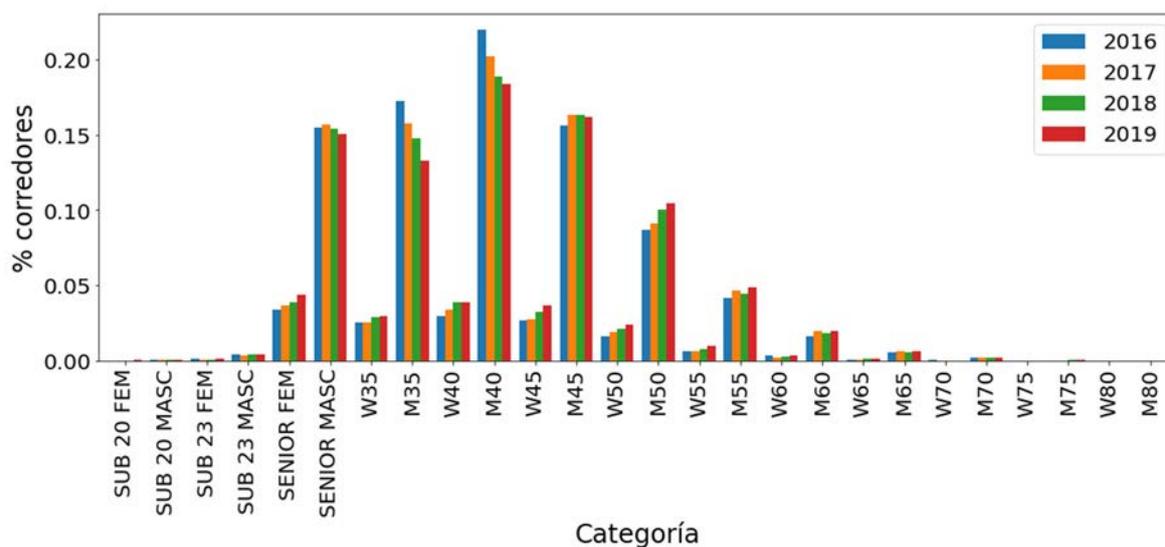
Este mismo fenómeno se puede observar si analizamos los tantos por ciento de cada una de las categorías en las que se divide el maratón (Figura 3). Concretamente, la mayor reducción de corredores masculinos (categorías *M*) se produce en tres categorías de las que mayor presencia tienen en el maratón – *Senior Masc*, *M35* y *M40* –. Sin embargo, la proporción de hombres para el resto de categoría – hombres menores que 23 años y mayores de 40 años – se ha mantenido e incluso ha crecido a lo largo de los años. Por su parte, la participación de mujeres ha aumentado en prácticamente todas las categorías.

A grandes rasgos, el grueso de la carrera se concentra en la franja de edad comprendida entre los 23 años – incluso superior, aunque no se puede verificar con los datos disponibles – y los 45 años.

La presencia de cada una de las categorías restantes se va diluyendo con la edad. También es llamativa la poca participación de jóvenes menores de 23 años, confirmándose que la práctica del *running* se desarrolla en edades más avanzadas, muchas veces cuando las personas dejan de realizar otro deporte considerado como principal (p.ej., fútbol o baloncesto).



**Fig. 2 – Proporción de hombres y mujeres entre 2016 y 2019**



**Fig. 3 – Proporción de hombres y mujeres por categorías entre 2016 y 2019**

La Figura 4 presenta la distribución de corredores según el ritmo promedio para los distintos maratones evaluados. Como se puede apreciar, la distribución de ritmos es prácticamente similar. Este hecho confirma que existe un patrón o comportamiento común en este tipo de pruebas y, por tanto, los resultados de los análisis que se presentan más adelante para el maratón de 2019 pueden ser extrapolables a las carreras desarrolladas con anterioridad a pesar de que el número de corredores ha crecido desde 2016 a una tasa anual aproximadamente del 10% (Tabla 2).

Particularmente, la distribución presenta una asimetría ligeramente positiva, con un ritmo promedio de alrededor de 5:25 min/km (Tabla 2). El crecimiento repentino de la distribución desde ritmos bajos indica que existen pocos corredores rápidos o de élite, mientras que la cola que se observa para los ritmos más altos es sinónimo de una mayor proporción de corredores lentos (Figura 4). Asimismo, el 50% de los corredores presentan ritmos medios entre 4:50 min/km y 6 min/km (Tabla 2).

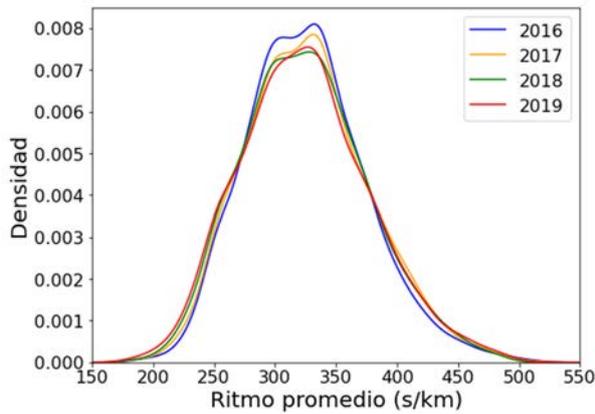


Fig. 4 – Distribución de corredores por ritmo medio entre 2016 y 2019

	2016	2017	2018	2019
<b>Número de participantes</b>	15858	16187	19243	21196
<b>Ritmo promedio (s/km)</b>	326.00	326.98	325.14	324.68
<b>Desviación estándar del ritmo (s/km)</b>	49.23	51.36	51.64	53.33
<b>Ritmo mínimo (s/km)</b>	181.44	178.1	177.01	176.09
<b>Percentil 25 (s/km)</b>	291.84	291.27	288.85	287.62
<b>Percentil 50 (s/km)</b>	323.51	324.73	322.67	322.36
<b>Percentil 75 (s/km)</b>	356.32	358.88	359.41	358.29
<b>Ritmo máximo (s/km)</b>	526.51	522.95	494.94	520.49

Tabla 2 – Resumen estadístico del ritmo

#### 4.2 Análisis de la salida

El análisis de la salida se ha realizado exclusivamente para el maratón del año 2019. En este caso, la salida se organizó en 4 olas (Tabla 3). Adicionalmente, la *Ola 1* se distribuyó en 5 cajones, la *Ola 2* y *3* en 2 cajones y la *Ola 4* en un único cajón. Aunque sí se ha podido identificar la ola a la que pertenece cada corredor gracias a los datos relativos al desfase de la salida para cada corredor, la asignación en cajones no se pudo llevar a cabo.

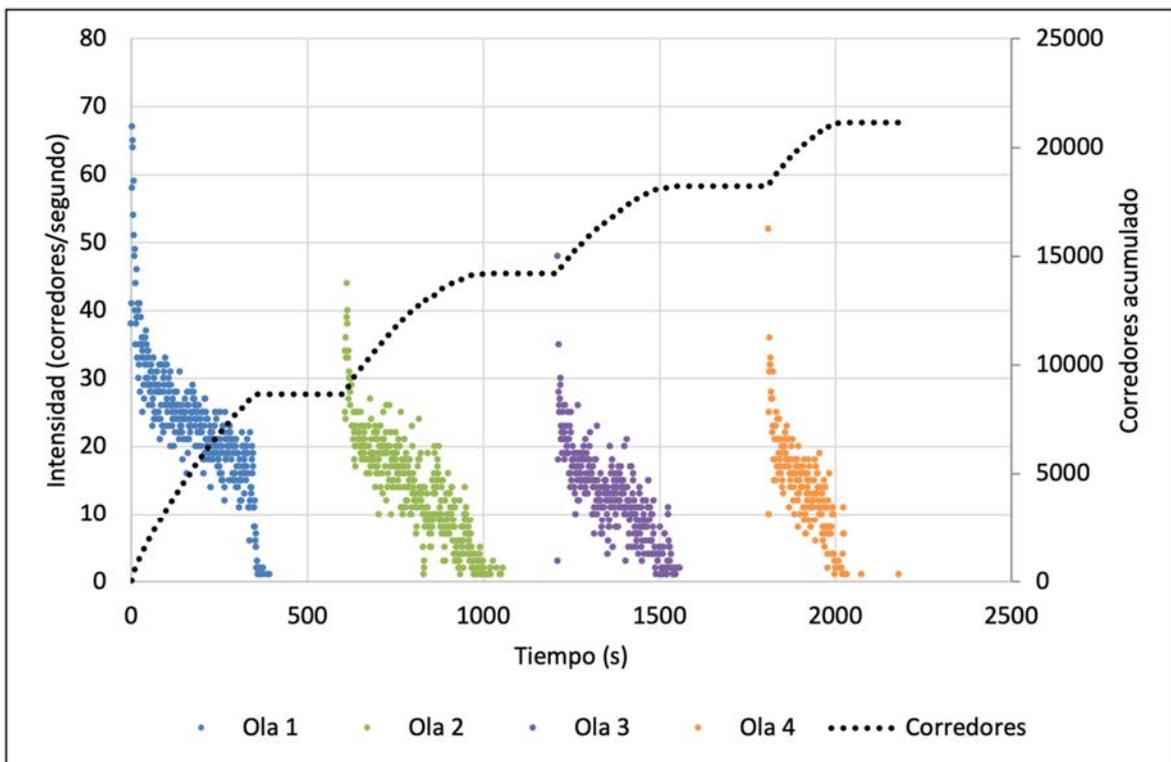
Ola	Desfase (min)	Tiempo objetivo (hh:mm:ss)
<b>Ola 1</b>	0	< 03:31:00
<b>Ola 2</b>	10	< 03:46:00
<b>Ola 3</b>	20	< 04:01:00
<b>Ola 4</b>	30	≥ 04:01:00

Tabla 2 – Distribución de olas en el maratón de 2019

La Figura 4 muestra la intensidad de descarga de corredores por segundo junto al número de corredores acumulado a lo largo del tiempo. Como se puede apreciar, entre cada una de las olas existe un cierto intervalo de tiempo que se emplea para el posicionamiento en la salida de los corredores de la siguiente ola.

Focalizando la atención en la descarga de corredores de las olas, se puede intuir una reducción de las intensidades de descarga de cada una de ellas con el paso del tiempo.

Además, comparando las intensidades de unas olas con otras, se observan mayores valores de la intensidad en la *Ola 1* que en la *Ola 2* y, a su vez, mayores en la *Ola 2* que en la *Ola 3* y *4*. Este fenómeno también se puede apreciar por la pendiente de la recta tangente a la curva que muestra el número de corredores acumulado por segundo (línea negra a puntos en Figura 5). En este sentido, la pendiente ligada a la *Ola 1* es mayor que la de la *Ola 2*, siendo la pendiente de esta última ola mayor que las observadas en la *Ola 3* y *4*.



**Fig. 5 – Descarga de corredores**

Para analizar con mayor detalle la descarga de corredores en cada una de las olas, se ha establecido un origen de tiempos similar para todas ellas (Figura 6) y se ha calibrado un modelo para cada una de ellas según la forma funcional de la Ecuación (1), que responde al comportamiento asintótico, tanto horizontal como vertical, que presenta la intensidad a lo largo del tiempo.

$$y(t) = \frac{\beta_1}{t^{\beta_2}} + \beta_3 \quad (1)$$

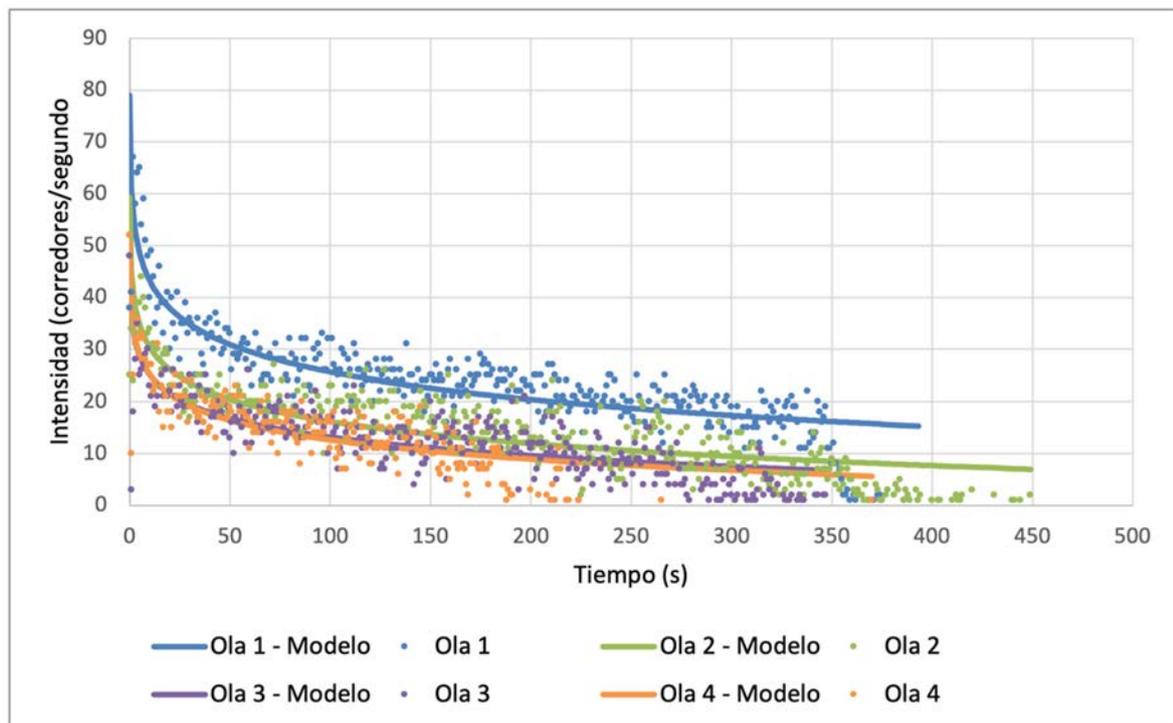
donde  $y(t)$  es la intensidad de descarga de corredores medida en corredores por segundo;  $t$  es el tiempo transcurrido en segundos; y  $\beta_i$  son los coeficientes del modelo.

La Tabla 3 presenta un resumen de la calibración de los modelos, mientras que la Figura 6 muestra cada modelo junto a los datos observados de la intensidad de descarga de corredores.

En primer lugar, cabe destacar que los modelos calibrados presentan una precisión adecuada – coeficiente de correlación entre 0.60 y 0.71 – para el fenómeno estudiado. Además, ponen de manifiesto todas las observaciones indicadas anteriormente para la Figura 5. A este respecto, los modelos estiman mayores intensidades de descarga para la *Ola 1*, intensidades bastante menores para la *Ola 2* y, a su vez, intensidades bajas tanto para la *Ola 3* y *4*, que prácticamente presentan resultados similares.

	Ola 1	Ola 2	Ola 3	Ola 4
$\beta_1$	1621.48	1585.48	1660.00	1741.83
$\beta_2$	0.00479	0.00396	0.00315	0.00315
$\beta_3$	-1560.48	-1540.67	-1622.90	-1704.06
$R^2$	0.71	0.66	0.60	0.66

**Tabla 3 – Modelos de descarga de corredores en salida**



**Fig. 6 – Modelos de intensidad de descarga de corredores en la salida según ola**

Los resultados obtenidos en cuanto a la intensidad de descarga están estrechamente asociados a los ritmos de los corredores de cada una de las olas. En principio, los ritmos son más rápidos en las primeras olas, lo que se traduce en mayores intensidades de descarga. Por el contrario, los ritmos lentos asociados a la *Ola 3* y *4* producen intensidades de descarga mucho más reducidas.

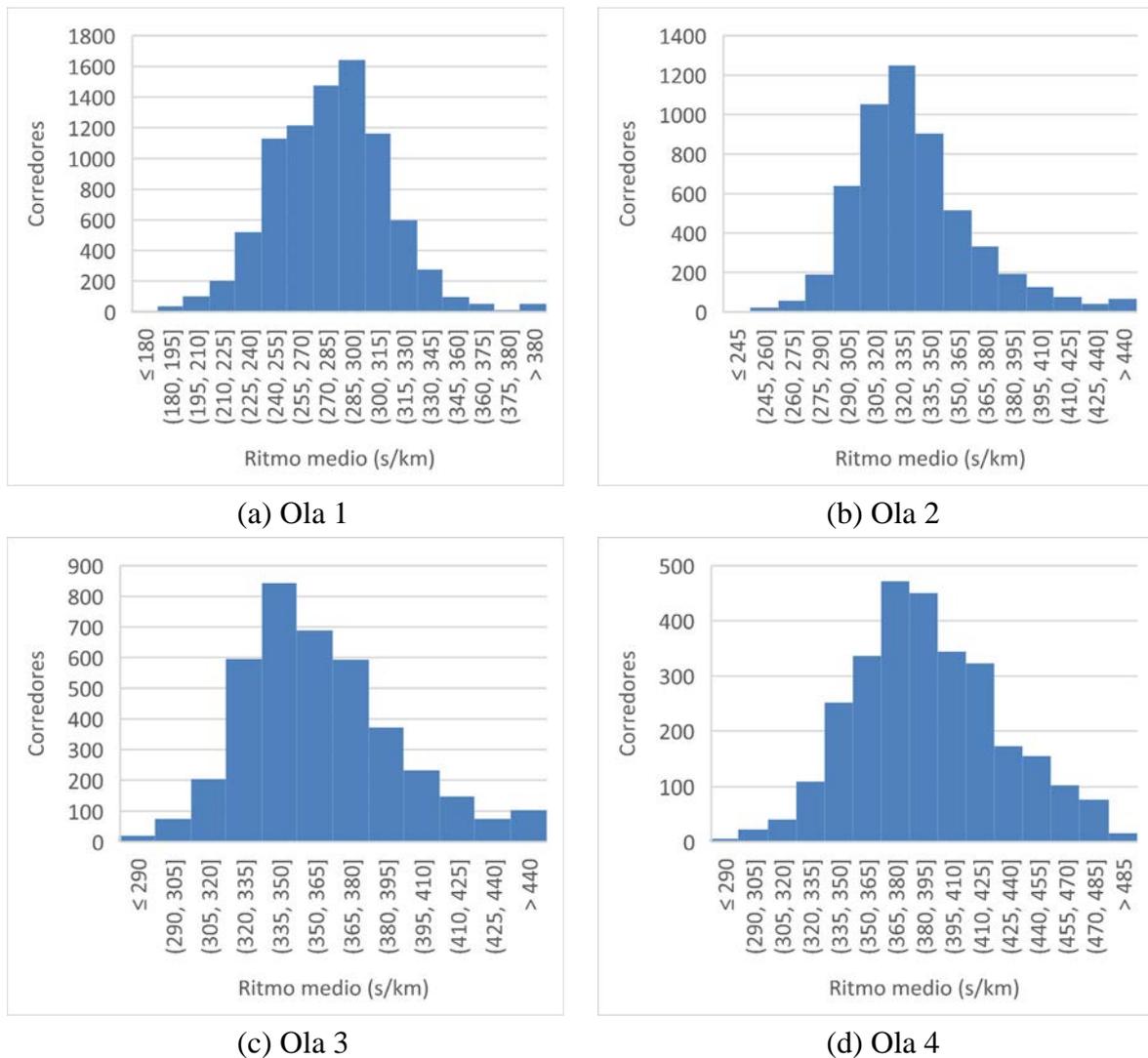
### 4.3 Análisis de ritmo

En las secciones anteriores se ha analizado el ritmo promedio de la carrera y la distribución de corredores en función de su ritmo medio.

Ahora se estudio con mayor nivel de detalle la evolución del ritmo de cada corredor a lo largo de la carrera, es decir, si aumenta de manera progresiva su ritmo o si el propio desgaste de la carrera le lleva a reducir el ritmo en los kilómetros finales.

Para ello, se cuenta con los tiempos de paso por el kilómetro 5k, 10k, 15k, 21.097k – media maratón –, 25k, 30k, 35k, 40k, 42,195k – meta –. A partir de estos tiempos se ha estimado, para cada corredor, el ritmo promedio de cada uno de los intervalos de distancia producidos por los puntos de paso.

En primer lugar, la Figura 7 muestra la distribución de ritmos de los corredores de cada una de las olas. Por tanto, la forma de la distribución general (Figura 4) es el resultado de la suma de otras distribuciones. Mientras que las distribuciones asociadas a la *Ola 2* y *3* presentan claramente una asimetría positiva, en aquellas ligadas a la *Ola 1* y *4* la asimetría no es tan evidente. El ritmo medio de cada una de la *Ola 1*, *2*, *3* y *4* es 4:40, 5:34, 6:00 y 6:30 min/km, respectivamente.



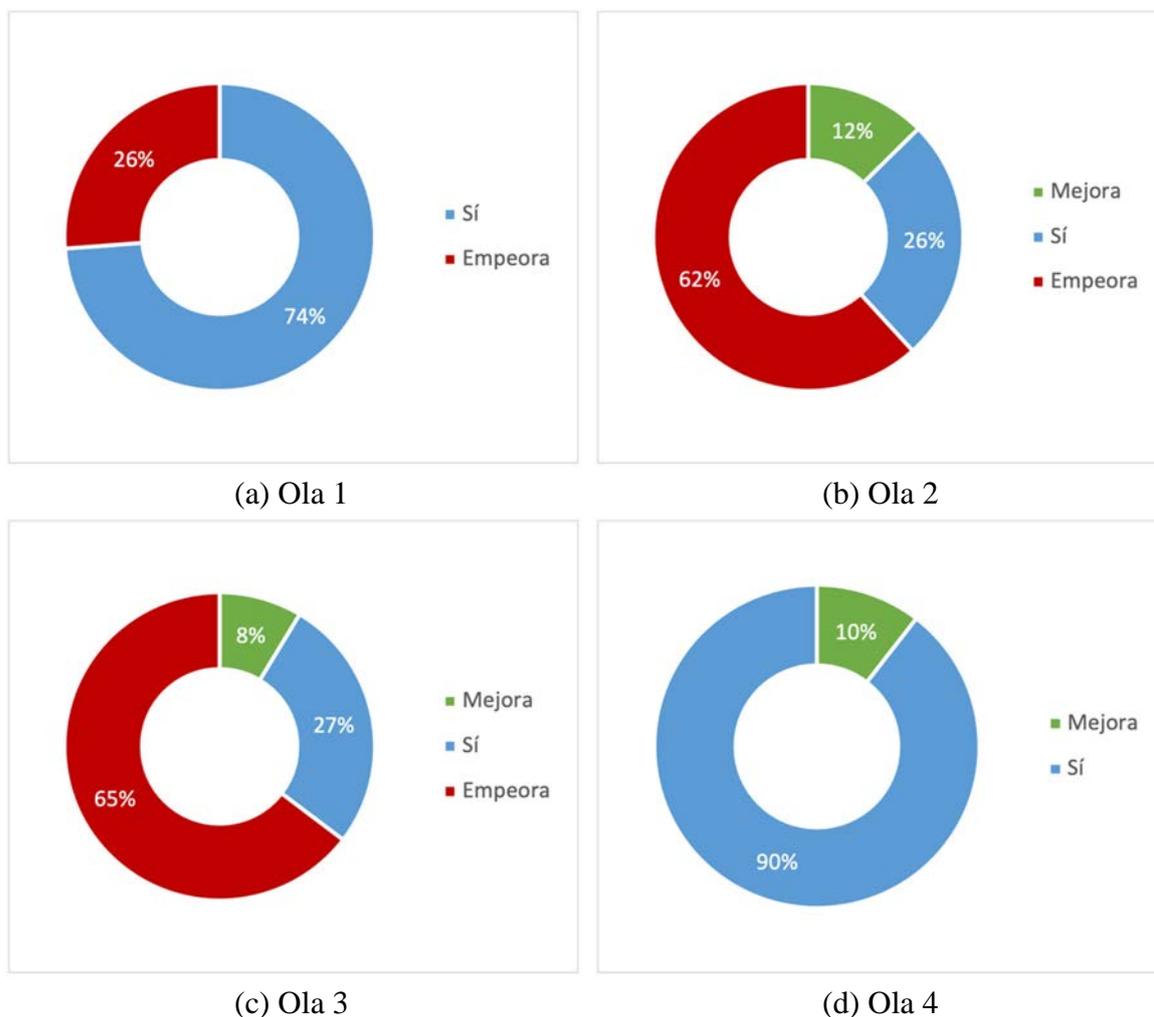
**Fig. 7 – Distribución de ritmos por ola**

A la hora de participar en el maratón, cada participante debe proporcionar un tiempo estimado de finalización de la carrera que la organización utiliza para la distribución de corredores en olas y cajones. En algunos maratones se suele pedir alguna prueba de ello – basado en carreras previas –, pero en otros no.

Para determinar el grado en que los corredores cumplieron su objetivo en el maratón de 2019, se ha comparado el tiempo asociado a cada ola (Tabla 2) con el tiempo real de la prueba (Figura 8).

De este modo, se ha identificado que el tanto por ciento de corredores que empeoran el tiempo previsto aumenta conforme mayor es el tiempo previsto para finalizar la carrera, desde el 26% de corredores de la *Ola 1* al 65% de la *Ola 3*. Por otro lado, se observa una pequeña parte de corredores – alrededor del 10% en cada ola – que mejoran su tiempo previsto.

Además, destacar que en las olas centrales – *Ola 2* y *3* – únicamente un cuarto de los corredores cumple – “Sí” – con el tiempo esperado (Figura 8). Finalmente, es necesario resaltar que sería necesario estudiar, dentro de la *Ola 1*, el cumplimiento de los tiempos previstos asociados a cada uno de los cajones que la integran.



**Fig. 8 – Cumplimiento de tiempo estimado de finalización**

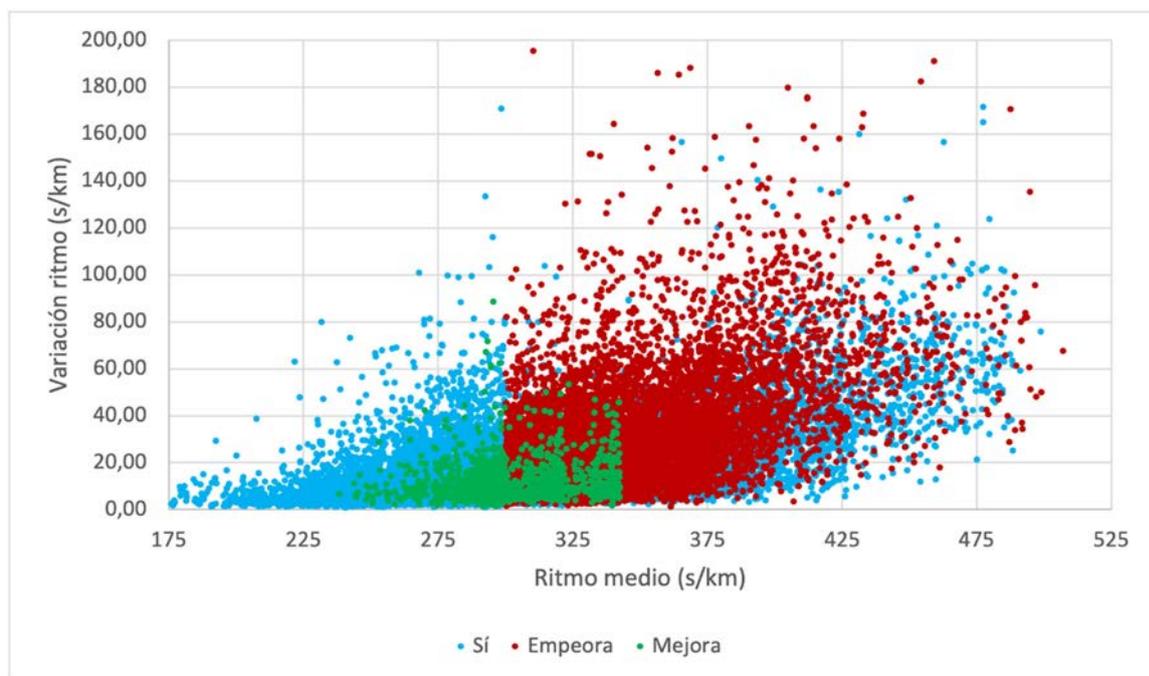
Una vez estudiadas las distribuciones de ritmos de cada ola e identificada la poca proporción de corredores que cumplen con los tiempos previstos, a continuación se compara el ritmo medio de cada corredor con la variación del ritmo a lo largo de la carrera (Figura 9). Para ello, la variación del ritmo ha sido estimada como la desviación típica de los ritmos promedios estimados en cada punto de control.

Estos ritmos promedios son estimados como el ritmo medio entre dos puntos de control consecutivos. De esta manera, para cada corredor se dispone de un total de ocho ritmos promedios, asignados a cada punto de control (ver Tabla 1). Por ejemplo, el ritmo promedio en el punto de control 5k será el ritmo medio, en s/km, desde la salida hasta el kilómetro 5.

Por su parte, el ritmo promedio en el punto de control 30k será el ritmo medio entre el kilómetro 25 y 30.

En primer lugar, se ha observado un aumento de la variación del ritmo conforme el ritmo promedio de los corredores incrementa. Este fenómeno se debe al hecho de que cuanto más rápido es un corredor, teóricamente, en mejor forma física se encuentra para desarrollar la carrera, lo que conduce a experimentar menores cambios de ritmo a lo largo de la carrera.

Además, para un mismo ritmo medio de carrera, aquellos corredores que mejoran el tiempo previsto presentan variaciones del ritmo significativamente menores a aquellos que empeoran su tiempo esperado de carrera.



**Fig. 9 – Cumplimiento de tiempo estimado de finalización**

Una vez identificadas las diferencias generales entre los grupos analizados – corredores que cumplen tiempo previsto, lo mejoran o lo empeoran –, ahora se compara el ritmo medio de la carrera con el ritmo promedio estimado en cada punto de control. En la Figura 10 se representa el ritmo medio de la carrera frente a la ratio entre dicho ritmo y el ritmo en un determinado punto de control.

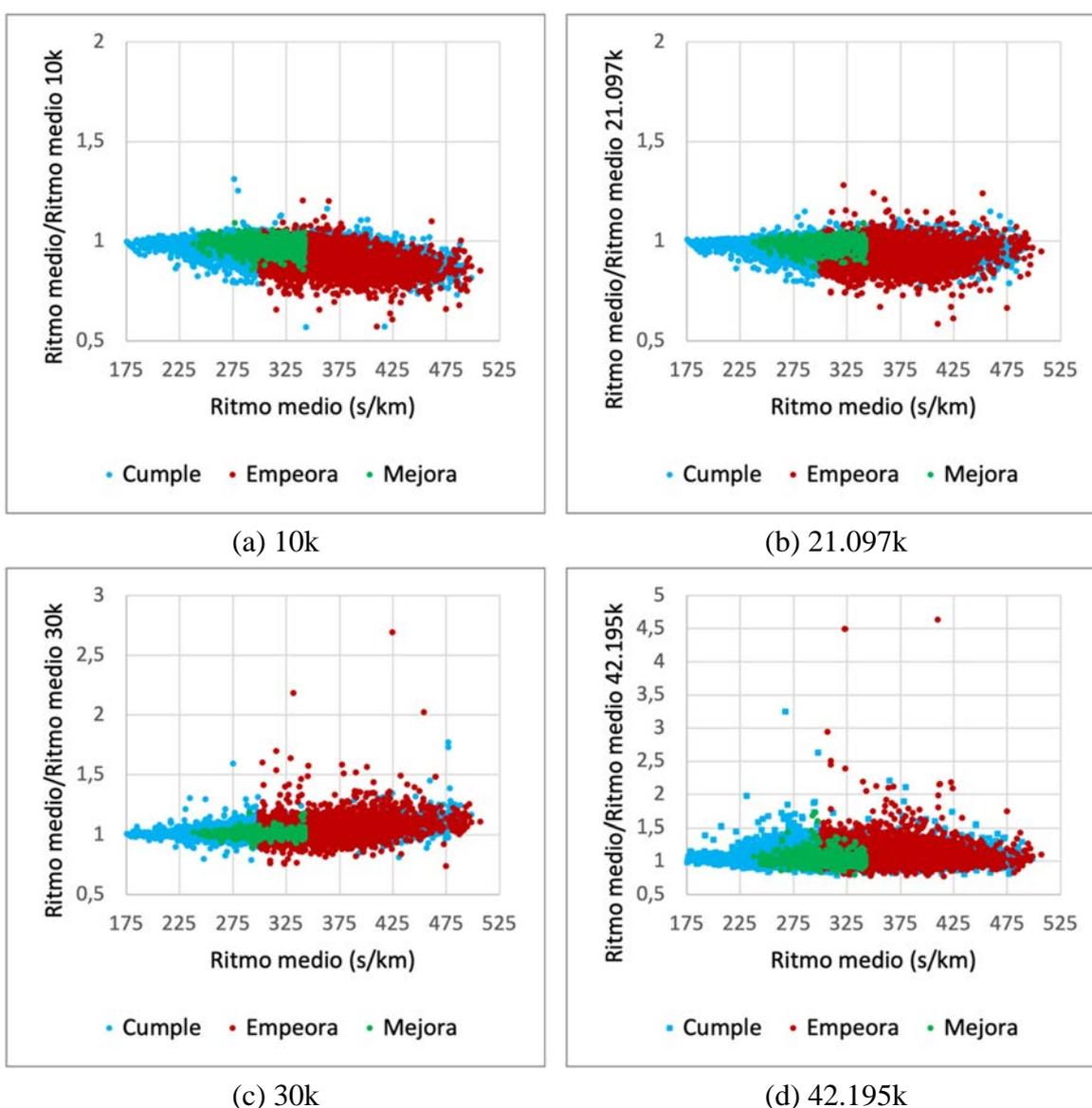
De esta forma, una ratio mayor que 1 significa que el ritmo del corredor asociado a ese punto de control es superior al medio de la carrera, es decir, va más lento. Por el contrario, un valor menor que 1 indica que el corredor ha recorrido a un ritmo más rápido que el ritmo promedio de la carrera la longitud que separa ese punto de control y el anterior.

De manera general, cuanto mayor es el ritmo medio de la carrera, más se aleja la tasa evaluada del valor 1.

Aquellos corredores que cumplen o empeoran el tiempo previsto experimentan una reducción del ritmo conforme avanza la carrera.

En este sentido, se observan ritmos más rápidos – ratio menor que 1 – en la primera mitad de la carrera (Figura 10a y 10b) y ritmos lentos – ratio mayor que 1 – en la segunda parte de la misma (Figura 10c y 10b).

Por otra parte, los corredores que mejoran su tiempo esperado parecen ser más conservadores al inicio de la carrera – ratios ligeramente menores a 1 –, lo que les permite mantener un ritmo muy similar al promedio de la misma – ratio igual a 1 – en la parte final (Figura 10c y 10d).



**Fig. 10 – Evolución del ritmo a lo largo de la carrera**

Concluyendo, la variación del ritmo de los corredores aumenta a medida que lo hace el ritmo medio de la carrera. Mientras que los corredores elite – asociados a ritmos muy bajos – y los corredores que mejoran su tiempo previsto son capaces de mantener un ritmo aproximadamente constante a lo largo de la carrera, el resto de los corredores tienden a ir más rápido en la primera parte de la carrera, lo que les conduce – principalmente por fatiga muscular – a ritmos significativamente mayores al ritmo promedio de la carrera en la parte final de la misma.

#### 4.4 Análisis espacio-temporal

Esta última sección del análisis se centra en el estudio de la intensidad y la densidad de corredores a lo largo de la carrera, considerando un intervalo espacial de un kilómetro. Para ello, se ha asumido que cada participante corre cada kilómetro de carrera al ritmo promedio asociado al siguiente punto de control – ritmo calculado a partir de los tiempos de paso entre ese punto de control y el anterior –. Por ejemplo, en el kilómetro 26 se asume que el corredor lleva el ritmo asociado al punto de control 30k, ya que dicho ritmo se ha estimado a partir de la diferencia de tiempos entre los puntos de control 25k y 30k, dividido entre cinco kilómetros (30-25).

La Figura 11 presenta la intensidad de corredores por minuto, en cada punto de control de la carrera (representados por colores), a lo largo del tiempo. La intensidad de corredores en la salida presenta ciertos saltos bruscos que están asociados, como ya se ha comentado anteriormente, a la salida de cada una de las olas. Estos saltos se van laminando conforme la carrera avanza, es decir, en los puntos de control sucesivos, de manera que las intensidades más altas se observan en los primeros puntos de control. En este sentido, la Figura 12 muestra las intensidades máximas en cada kilómetro de la carrera.

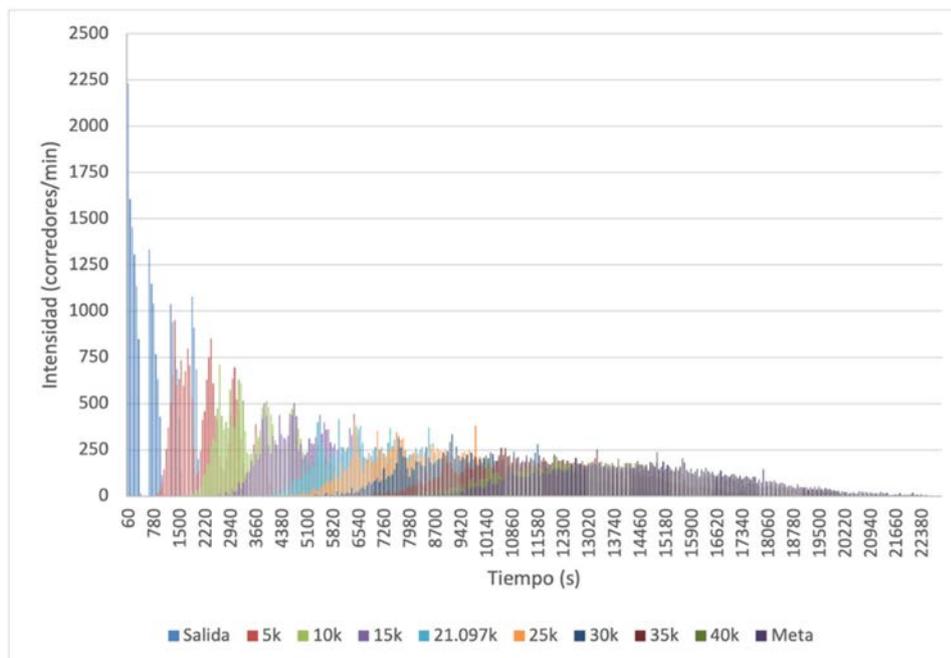
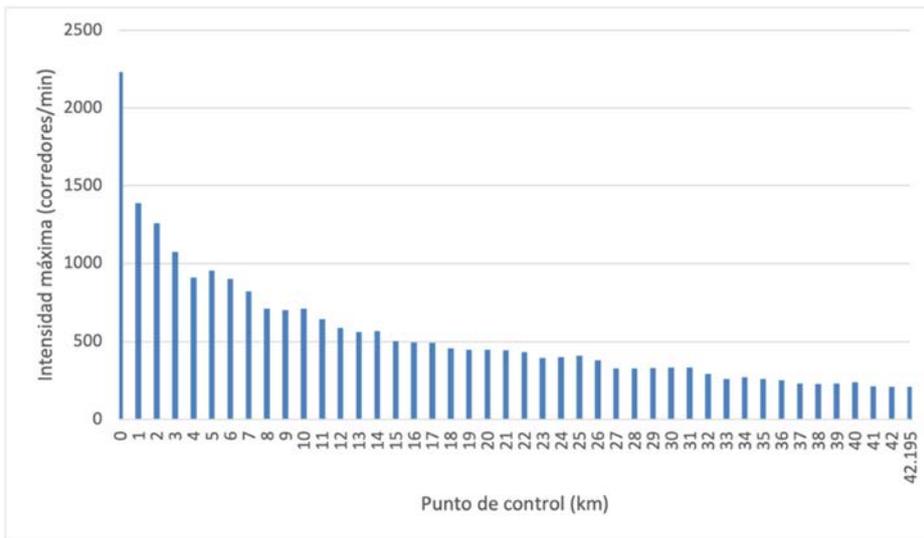


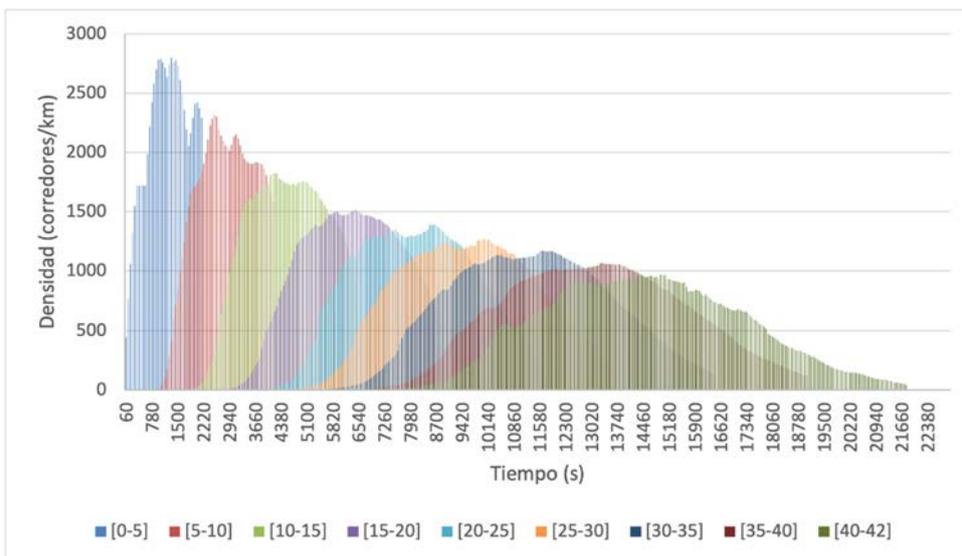
Fig. 11 – Intensidad de corredores por minuto en puntos de control



**Fig. 12 – Intensidad máxima de corredores en puntos de control**

Paralelamente, también se ha estudiado la evolución de la densidad de corredores, estimada como la cantidad de corredores por kilómetro (Figura 13). Para ello, se ha identificado el número de corredores que se encuentran entre dos puntos de control a lo largo del tiempo.

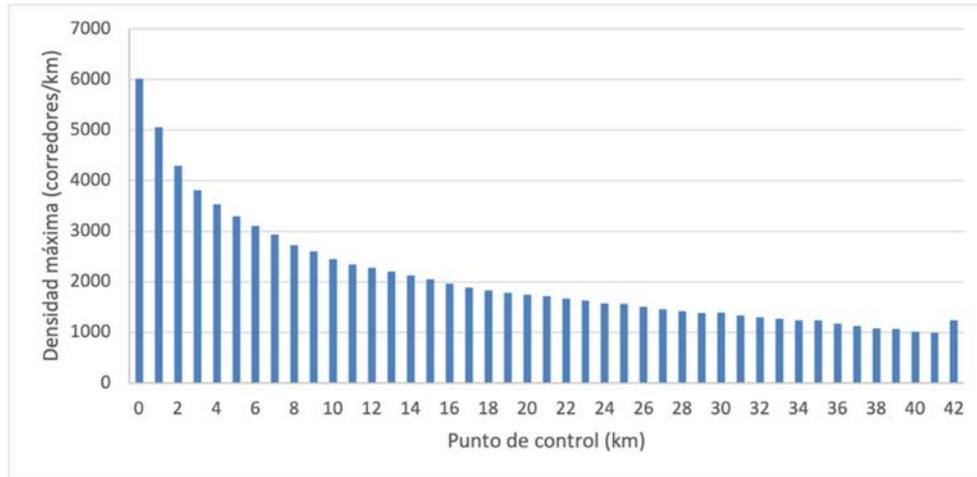
Al igual que ocurre para la intensidad, las mayores densidades de corredores se producen en los primeros kilómetros de la carrera. A medida que la carrera avanza las densidades van disminuyendo, lo que conduce a que la llegada de corredores a meta se realice paulatinamente.



**Fig. 13 – Densidad de corredores por kilómetro en intervalos de longitud entre puntos de control**

Finalmente, la Figura 14 presenta la densidad de corredores máxima en cada kilómetro de la carrera.

En este sentido, la densidad máxima en cada valor del eje de abscisas está asociada a la cantidad de corredores entre ese valor y el siguiente. Por ejemplo, la densidad máxima para el valor 5 expresa la densidad entre los kilómetros 5 y 6. De acuerdo con lo observado anteriormente, la máxima concentración de corredores se produce en los primeros kilómetros de carrera mientras que a partir del kilómetro 10 la densidad experimenta una reducción muy pausada.



**Fig. 14 – Densidad máxima de corredores por kilómetro**

Resumiendo, las secciones más críticas durante la carrera se encuentran al inicio de la misma, cuando la intensidad de corredores, expresada en número de corredores por minuto, y la densidad de corredores, expresado en número de corredores por kilómetro, alcanzan sus valores más elevados. Conforme avanza la carrera, ambas variables se reducen considerablemente fomentando una llegada a meta con un flujo de corredores constante y pausado.

## 5. DISCUSIÓN

Conocer la distribución de corredores a lo largo del tiempo en carreras populares con gran participación puede permitir una gestión más eficiente de la carrera, desde aspectos relacionados con la configuración de la salida en olas y cajones, hasta la disposición de avituallamientos y los anchos mínimos requeridos por unidad de longitud.

Particularmente este último aspecto – ancho mínimo por sección – cobra especial importancia debido a la pandemia de la COVID-19. Conociendo la intensidad de corredores en cada sección, la densidad de corredores por kilómetro y el ritmo medio de los corredores en cada instante y sección se puede estimar el ancho mínimo para garantizar una distancia de seguridad entre participantes.

Para ello, se puede partir del modelo teórico ideal representando en la Figura 15 en el que todos los corredores están equiespaciados a una distancia de seguridad  $d$ . Bajo esta premisa,



$$D_t \cdot a = \frac{I}{v} = I \cdot R; D_t = \frac{I \cdot R}{a} \quad (8)$$

Por otro lado, la densidad transversal también se puede estimar como el cociente entre el número de corredores  $n$  que puede atravesar una sección – limitado por la distancia de seguridad (Ecuación 2) – y su anchura (Ecuación 9).

$$D_t = \frac{n}{a} = \frac{\frac{a}{d} + 1}{a} \quad (9)$$

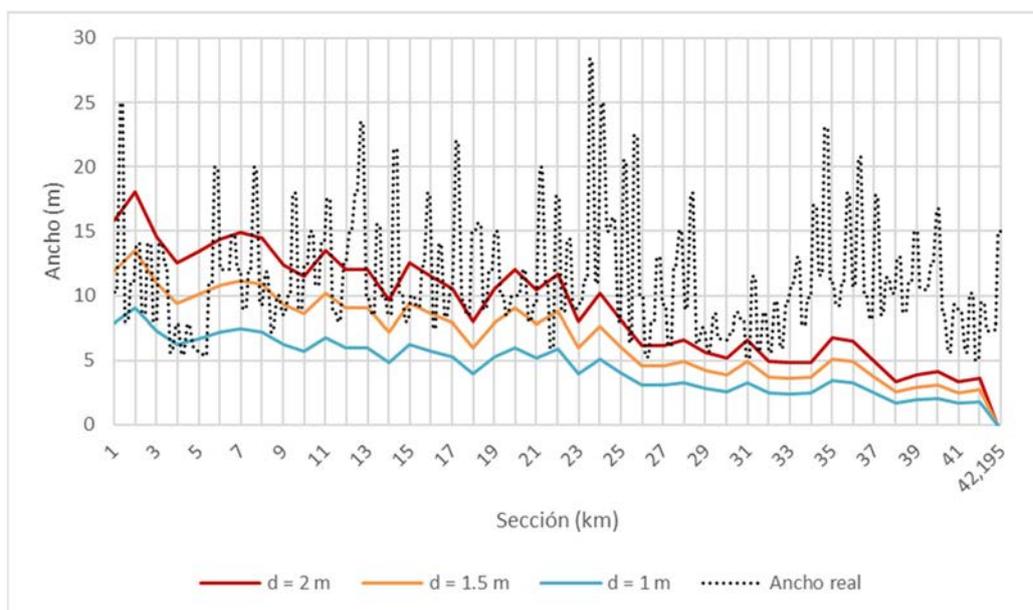
Combinando la Ecuación 8 y 9 se obtiene la expresión que permite estimar el ancho requerido en una sección dada una intensidad de corredores, con un ritmo específico y asumiendo una determinada distancia de seguridad (Ecuación 10).

$$\frac{I \cdot R}{a} = \frac{\frac{a}{d} + 1}{a} \quad (10)$$

$$a = (I \cdot R - 1) \cdot d \quad (10a)$$

donde  $a$  es el ancho requerido (m);  $I$  la intensidad máxima de la sección (corredores/s);  $R$  el ritmo promedio de los corredores asociado a la intensidad máxima (s/m); y  $d$  la distancia de seguridad (m).

La Figura 16 muestra el ancho mínimo requerido al paso por cada kilómetro de la carrera asumiendo diferentes distancias de seguridad. Como se esperaba, los anchos más restrictivos se encuentran en las secciones iniciales de la carrera, cuando la intensidad de corredores es más elevada. Concretamente, la sección que requiere de un mayor ancho se encuentra en el kilómetro 2, con un valor de casi 16 m para una distancia de seguridad de 2 m.



**Fig. 16 – Ancho mínimo por sección según intensidad máxima**

Comparando los anchos reales de la carrera con los obtenidos se puede afirmar que la carrera no puede desarrollarse en condiciones de seguridad en escenarios de pandemia que requieran asegurar un distanciamiento social como es el caso de la pandemia provocada por la COVID-19 durante el último año, puesto que el ancho real es inferior a los anchos mínimos requeridos para una distancia de seguridad de 2 m en los primeros 6 kilómetros de carrera.

Asimismo, a lo largo de la primera mitad de la carrera se suceden, para la distancia citada, multitud de secciones críticas. No obstante, considerando distancias menores – 1.5 y 1 m – el número de secciones con anchos menores a los requeridos disminuye considerablemente.

Particularmente, para una distancia de seguridad de 1.5 m se observan secciones críticas hasta el kilómetro 10, mientras que considerando 1 m solo se identifican problemas de ancho de sección en los primeros 5 kilómetros.

En caso de mantener el trazado actual, para garantizar que se cumple la distancia de seguridad establecida, se podría reconfigurar la salida, es decir, modificar el número de olas y cajones y el desfase entre olas. Con ello se podría suavizar las altas intensidades y densidades de corredores en los primeros kilómetros.

## 6. CONCLUSIONES

Las maratones se han convertido en los últimos años en las carreras más populares aglutinando a miles de corredores. Concretamente, la maratón de la ciudad de Valencia ha experimentado un crecimiento anual de un 10% entre sus ediciones de 2016 y 2019, lo que supone que en este último año se sobrepase la cifra de 21,000 participantes. A medida que estas carreras crecen en magnitud su gestión es más complicada y conocer el comportamiento de las variables que definen el flujo de corredores es clave para garantizar que la carrera se desarrolle en condiciones de seguridad. Entre otras cuestiones, la caracterización del comportamiento del flujo de corredores permitirá una mejora de la gestión relativa a la configuración de la salida – definición de olas y cajones –, la disposición de avituallamientos y el establecimiento del recorrido a partir de los anchos mínimos requeridos en cada sección. Este último aspecto todavía cobra mayor importancia en situaciones de pandemia como la actual en la que se debe respetar una distancia social.

Para caracterizar el comportamiento de los corredores esta investigación se ha centrado en el análisis de los maratones celebrados en la ciudad de Valencia (España) desde 2016 a 2019. Los datos generales e individuales de estas carreras están disponibles de manera gratuita en la web de la organización del evento y fueron obtenidos mediante un script de *web scraping* programada exclusivamente para tal fin. A partir de los datos filtrados se estimaron, entre otras variables, los ritmos individuales de cada corredor a su paso por cada punto de control, el desfase de tiempo en la salida, la intensidad de corredores en las secciones correspondientes a cada kilómetro de la carrera y la densidad de corredores por kilómetro.

Como resultado, se identificó un aumento de la participación de las mujeres a lo largo de los años, situándose en 2019 en alrededor de un 20%. En general, el grueso de la carrera se concentra en la franja de edad comprendida entre los 23 años y los 45 años. La presencia de cada una de las categorías restantes se va diluyendo con la edad.

En cuanto a la evolución de corredores en la salida, se verifica que cuanto menor es el tiempo objetivo ligado a la ola, mayor es la intensidad de descarga de corredores. Asimismo, en todas las olas se observa una reducción de la intensidad de descarga con el paso del tiempo.

En este sentido, los modelos calibrados podrían ser empleados para estimar el número de corredores máximo por ola y/o el desfase entre olas.

A la hora de participar en el maratón, cada participante proporciona un tiempo objetivo que la organización utiliza para la distribución de corredores en olas y cajones. Aunque en este caso solo se ha podido analizar el cumplimiento de este tiempo por olas, resulta bastante claro que el tanto por ciento de corredores que empeoran el resultado previsto aumenta conforme mayor es el tiempo objetivo, desde el 26% de corredores de la *Ola 1* al 65% de la *Ola 3*. Asociado a este incumplimiento, se ha verificado que cuanto mayor es el ritmo medio de la carrera, mayor es la variación del ritmo a lo largo de esta.

Concretamente, aquellos corredores que cumplen o empeoran el tiempo objetivo experimentan ritmos más rápidos en la primera mitad de la carrera y ritmos lentos o muy lentos en la segunda parte de la misma. Por el contrario, los corredores más rápidos – ritmos medios menores a 225 s/km – y los que mejoran su tiempo objetivo parecen ser más conservadores al inicio de la carrera y mantienen su ritmo constante a lo largo de esta.

Finalmente, el análisis de la intensidad y la densidad refleja que las secciones más críticas durante la carrera se encuentran al inicio de la misma, cuando ambas variables alcanzan sus valores más elevados. Conforme avanza la carrera, tanto la intensidad como la densidad se reducen considerablemente fomentando una llegada a meta con un flujo de corredores constante y pausado.

Conocer de manera previa estas dos variables es fundamental para la definición del recorrido de la prueba – condicionada por el ancho de las secciones – con el fin de garantizar que todos los corredores se encuentren en flujo libre – no condicionados por otros corredores – a lo largo de toda la carrera.

Todavía es más interesante si cabe la determinación del ancho mínimo requerido en cada sección de la prueba con el fin de garantizar una distancia social entre corredores – sobre todo en la situación actual de pandemia provocada por la COVID-19 –.

Este ancho mínimo puede ser estimado a partir de la intensidad máxima y el ritmo promedio que se producirá en cada sección del recorrido asumiendo el modelo teórico presentado en este trabajo.

Los resultados de esta investigación están limitados a los resultados obtenidos en los maratones de la ciudad de Valencia. Con el fin de generalizar las conclusiones obtenidas es necesario el análisis preferiblemente de otros maratones que también ofrezcan sus datos de manera abierta como, por ejemplo, la maratón celebrada en Berlín, Londres o Nueva York.

Asimismo, sería conveniente ampliar el análisis centrándose en cada cajón, para lo que sería necesario en algunos casos, como el del maratón de Valencia, la colaboración de la organización del evento, pues este tipo de datos habitualmente no es proporcionado ni se puede inferir de manera precisa, aunque sí podría ser estimado de manera aproximada por el desfase en la salida. Por último, sería interesante estudiar cómo la configuración de la salida influye en la intensidad y densidad de corredores en la parte inicial de la carrera con el fin de garantizar el cumplimiento, si es necesario, de la correspondiente distancia de seguridad por motivos sanitarios.

## REFERENCIAS

KWONG, H. S., & NADARAJAH, S. (2019). Modelling dynamics of marathons—A mixture model approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 534, 120798.

LIN, Z., & MENG, F. (2018). Empirical analysis on the runners' velocity distribution in city marathons. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 490, 533-541.

RODRIGUEZ, E., ESPINOSA-PAREDES, G., & ALVAREZ-RAMIREZ, J. (2014). Convection–diffusion effects in marathon race dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 393, 498-507.

RUNREPEAT Y IAU (2019). THE STATE OF RUNNING 2019. Acceso online: <https://runrepeat.com/state-of-running>

TREIBER, M. (2015). Crowd Flow Modeling of Athletes in Mass Sports Events: A Macroscopic Approach. In *Traffic and Granular Flow'13* (pp. 21-29). Springer, Cham.