

Evacuaciones de emergencia con presencia de grupos sociales

ERIC ROZÁN

TESIS DE LICENCIATURA
OCTUBRE 2020



Carátula

Área: Mecánica estadística

Nombre del Tesista: Eric Alejandro Rozán

Número de Libreta: 99/13

Lugar de trabajo: Departamento de Física - FCEyN - UBA

Nombre del director: Claudio Oscar Dorso

Nombre del co-director: Guillermo Alberto Frank

Fecha de iniciación: Septiembre 2019

Fecha de finalización: Octubre 2020

Fecha de examen: 1 de diciembre de 2020

Informe final aprobado por:

Autor

Jurado

Director

Jurado

Profesor de Tesis de Licenciatura

Jurado

Agradecimientos

Primero que nada quiero agradecer a mi director Claudio y a mi co-director Guillermo por acompañarme durante todo este último tramo de la carrera que es la tesis de licenciatura. Gracias por su mayor predisposición, por su tiempo y por el esfuerzo que pusieron de su parte para que este trabajo sea lo que es.

Le quiero agradecer a Ignacio y Fernando, ya que sin ellos esta tesis sería una pequeña porción parte de lo que es. Gracias por su infinita paciencia para explicarme las cosas hasta que las entendiera, cuando el pánico dejó de estar únicamente en las simulaciones y pasó a apoderarse de mí. Por las llamadas que han durado hasta 4 horas, evacuando dudas y teniendo risas fundamentales.

A unas tales mujeres llamadas Monica, Margot, Natalie y Artemis, a las que vi sólo una vez en una sala de computadoras pero sin ellas esta investigación estaría lejos de estar terminada.

A Federico y Sabrina, con quienes compartimos una cantidad irrisoria de charlas sin sentido y proyectos bizarros. Por aguantarme en tantas cursadas y por pasar tantas horas discutiendo sobre nuestro mundo.

A Annie, por endulzar esos días eternos con nuestras súper meriendas. Gracias por hacer que mi experiencia en la facultad sea un poco menos dura.

A Gabriela, por bancarme en cinco de las siete materias de laboratorio y unas cuantas materias más, con la cantidad de tiempo que eso implica. Por las traspachadas escribiendo informes, y las risas infinitas en la facultad provocadas por el poco sueño. Por las veces que me atendiste el teléfono y me ayudaste a tomar algunas de las decisiones más importantes de mi vida.

Al FEM!, un espacio hermoso en el que pasé seis años de mi vida, por enseñarme cómo canalizar las ganas de cambiar el mundo en un proyecto colectivo. Estoy seguro de que no sería el mismo si no hubiera compartido tantas horas de militancia que cambiaron mi forma de ser, de pensar y de proponer soluciones a todo tipo de problemáticas. Por haber grabado en mí que ninguna injusticia se da porque “las cosas son así”, sino que “están así y podemos cambiarlas”, sea en esta Facultad como en cualquier ámbito de la sociedad.

A Alan, Pablo y Miguel, por estos 12 años de amistad ininterrumpida. Por todo, casi literalmente. Por entender cuando les expliqué que no podía estar con ellos en diversas oportunidades en las que estaba consumido por la facultad, por darme ánimos cuando algo me salió mal, y por recibirme siempre que tuve algún problema mayor entre tantos otros agradecimientos.

A Romina, por el amor que me compartís día a día. Durante más de la mitad de mi carrera,

tu apoyo y tu energía fueron las principales fuentes de las fuerzas que necesité, en particular durante la realización de esta tesis. Gracias por amarme y por dejarme amarte. Por entender siempre cómo me siento, y saber justo lo que me anima. Por cada momento que compartimos, por lo que aprendimos, por lo que disfrutamos y por lo que logramos siempre que nos lo proponemos.

A mi familia, Mario, Marta, Brenda y Cynthia. Gracias por bancarme durante toda la carrera. Por contenerme todas las veces que estuve por colapsar, por estar presentes siempre que necesité algún consejo, por comprenderme y apoyarme en cada etapa de mi vida.

Y, finalmente, a mi bobe Perla y a mi tía Juanita, por darme fuerzas desde donde estén. Puedo asegurar que desde ahí están más orgullosas que nadie.

Índice

1. Introducción	8
1.1. Objetivos de la tesis	12
2. Marco Teórico	13
2.1. El Modelo de Fuerza Social (SFM)	13
2.2. Fuerza de atracción	15
2.3. <i>Blocking Cluster</i>	17
2.4. Diagrama Fundamental	17
3. Datos experimentales y resultados previos	20
3.1. Tiempo de evacuación sin presencia de grupos	20
3.2. Distancia entre grupos de dos personas (dúos)	22
3.3. Diagrama fundamental en el Puente de Jamarat	23
4. Simulaciones computacionales	26
4.1. Parámetros del modelo	26
4.2. Geometría de los recintos y configuraciones de las simulaciones	27
4.3. Condiciones iniciales	28
5. Resultados	30
5.1. Calibración de la fuerza de atracción	30
5.2. Evacuaciones de emergencia con grupos sociales: tiempo de evacuación	34
5.3. Descripción esquemática de los efectos <i>closer is slower</i> y <i>closer is faster</i>	38
5.4. Evacuaciones de emergencia con grupos sociales: <i>delays</i> entre individuos	39
5.4.1. <i>Delays</i> intra-grupales	40
5.4.2. <i>Delays</i> entre individuos o secuenciales	44
5.4.3. Clasificación de <i>Delays</i> intra-grupales e inter-grupales	47

5.4.4. Conclusiones preliminares sobre el análisis de <i>delays</i>	50
5.5. Diagrama fundamental con presencia de grupos sociales	52
6. Conclusiones	58
Apéndices	62
A. Fuerzas cerca del equilibrio	63
B. Evacuaciones con bajo nivel de ansiedad	66
C. Closer is slower y closer is faster en altas densidades	69

Resumen

En este trabajo se investigó, a través de simulaciones computacionales, cómo la presencia de grupos sociales en una multitud modifica la dinámica de las evacuaciones de emergencia. Partiendo del Modelo de Fuerza Social (SFM), se añadió una fuerza de atracción entre individuos para dar cuenta de la existencia de los lazos afectivos que generan grupos de dos o más personas. Se calibró esta fuerza atractiva con datos experimentales de la literatura. Se caracterizó en detalle cómo se modifica el tiempo de una evacuación al variar la cantidad de grupos presentes y la intensidad atractiva de los mismos, así como los comportamientos microscópicos detrás de esos cambios. También se investigó cómo se modifica el “diagrama fundamental de la dinámica peatonal” al incluir grupos de distinto tamaño y con distintos niveles de vínculos afectivos. Se encontró que la inclusión de grupos sociales modifica cualitativamente los resultados conocidos de la dinámica peatonal, en los que no se tiene en cuenta la existencia de los mismos.

Capítulo 1

Introducción

El problema de la dinámica de multitudes en estado de pánico ha atraído la atención de investigadores en diversas áreas. Su importancia práctica se refleja en el interés por estudiar situaciones concretas, como las evacuaciones de emergencia, la dinámica de multitudes en estampidas, o cualquier clase de eventos multitudinarios en los que se han producido catástrofes. Los avances en esta área de conocimiento prometen quebrar la tendencia creciente en tragedias registradas en los últimos años [1, 2].

Una de las últimas tragedias con gran relevancia en Argentina fue la ocurrida en Cromagnon, en 2004. Ésta inició con un incendio que desató el pánico y, combinado con otros factores, provocó una de las peores catástrofes en la historia de la música rock, con un saldo de 194 muertos y 1432 heridos [3]. Otra de las tragedias más importantes del país ocurrió en 1968 en el estadio de River Plate. Producto de una avalancha sobre la salida número 12 (*Puerta 12*) del estadio, murieron 71 personas y más de 60 personas resultaron heridas [4]. En el año 2012, ocurrió otra tragedia con gran relevancia en el pabellón Madrid Arena de España. Ésta se dio en una fiesta, durante un concierto de música electrónica. Tras una serie de avalanchas producidas en un pasillo del estadio, se produjo una congestión que dejó heridos por aplastamiento y 5 muertes. En distintos videos de la tragedia, se puede observar cómo agentes de seguridad intervienen para desarmar los amontonamientos y permitir la evacuación de los presentes [5].

En los últimos años el grupo de investigación dirigido por el Dr. Claudio Dorso investigó los comportamientos debidos al humo que dificulta la visión [6], a la asfixia [7] y a la presencia de obstáculos [8]. En los citados trabajos, no se consideró que los individuos formen parte de grupos afectivos, aunque manteniendo una actitud de tipo “individualista” se puede dar un movimiento “en manada”.

En la literatura se han empleado distintos enfoques para el estudio de la dinámica de multi-

tudes desde la física, la ingeniería o la psicología social entre otras áreas de estudio. Los enfoques físicos pueden clasificarse según sus características en varias categorías [9]:

- Microscópicos o macroscópicos: en los modelos microscópicos, cada persona es representada individualmente [10], mientras que en los modelos macroscópicos se define una función de densidad de individuos y se estudia su evolución [11].
- Discreto o continuo: según sea el caso, las variables de tiempo, espacio y velocidad son discretizadas [12] o continuas [10, 11].
- Basado en fuerzas o en reglas: en los modelos basados en fuerzas, se define el comportamiento de los individuos por medio de distintas fuerzas que actúan sobre ellos [10]. Luego, se resuelve un sistema de ecuaciones de movimiento para determinar la evolución del sistema. En cambio, en los modelos basados en reglas los individuos toman decisiones según lo que pueden ver en sus cercanías, como por ejemplo la distancia que los separa con otras personas o con el lugar al que desean llegar [12].
- Determinista o estocástico: en los modelos deterministas, siempre que un sistema tenga las mismas condiciones iniciales, su evolución será igual [10, 11]. Por el contrario, en un sistema estocástico el comportamiento tiene fluctuaciones aleatorias, ya que los individuos pueden tomar distintas decisiones ante la misma situación, o bien, porque los agentes simulados se mueven siguiendo funciones con una parte estocástica [12].

Entre los modelos más utilizados se encuentran los enfoques hidrodinámicos que, en términos de las mencionadas categorías, son modelos macroscópicos, continuos, basados en fuerzas y deterministas. Éstos se basan en la observación de que grandes multitudes se comportan como fluidos caracterizados por densidades, y siguen ecuaciones de movimiento similares a las de Navier-Stokes modificadas [11]. Otro enfoque comúnmente empleado es el de autómatas celulares [12], que son microscópicos, discretos, basados en reglas y estocásticos. En estos modelos el espacio se encuentra discretizado en celdas, y el tiempo se divide en “pasos”. Cada individuo ocupa una celda, y en cada paso tiene una probabilidad de moverse a otra dentro de su vecindario, que depende de las reglas definidas en el modelo.

Uno de los modelos más frecuentemente usados para modelar multitudes es el Modelo de Fuerza Social (**SFM**, por sus siglas en inglés) propuesto por Helbing *et al.* [10]. La hipótesis principal de este modelo es que el movimiento de cada individuo se debe a una combinación de fuerzas socio-psicológicas y físicas. Estas fuerzas se basan en observaciones sobre el comportamiento social de los individuos, y permite estudiar la dinámica microscópica del sistema [13].

En términos de las categorías mencionadas anteriormente, es un modelo microscópico, continuo, basado en fuerzas y determinista.

Se ha realizado una revisión de este modelo en varias oportunidades, siendo consistente con los (escasos) datos experimentales disponibles. Estos estudios permitieron describir comportamientos de multitudes en estado de pánico, tanto con respecto a la dinámica “global” o macroscópica del sistema como a comportamientos “individuales” o microscópicos [13, 14]. Se han estudiado estos comportamientos ya sea en situaciones de pánico como en concentraciones de multitudes en general [15]. Entre los estudios acerca de las evacuaciones de emergencia se incluyen:

- El análisis de la geometría de los recintos a evacuar y el impacto que causa en la evacuación [8, 16, 17].
- Los efectos causados al verse reducida la visibilidad (como por ejemplo a causa del humo en un incendio) [6].
- Cómo afectan a la dinámica del proceso las personas desmayadas por las altas presiones generadas [7].

Uno de los resultados más importantes dentro de la dinámica peatonal es lo que se conoce como “el Diagrama Fundamental”, que relaciona la densidad (peatones por m^2) y el flujo de individuos [18]. Se divide a grandes rasgos en dos regímenes caracterizados por comportamientos distintivos: el de libre circulación para bajas densidades, y de circulación congestionada para altas densidades. En el primer caso, el flujo de peatones se incrementa con la densidad, mientras que en el último se mantiene constante o decrece [18, 19]. Para densidades extremadamente altas, el movimiento no es completamente nulo. Este tipo de situaciones son peligrosas principalmente por los cambios drásticos en la dinámica de la multitud, por ejemplo por la aparición de ondas de densidad [20].

Uno de los casos más estudiados para el análisis del diagrama fundamental es el de la peregrinación a la Meca en Arabia Saudita durante el ritual de la “lapidación del diablo” del Hajj. Éste es un evento anual, en el que millones de musulmanes caminan por el Puente de Jamarat durante el transcurso de 24 horas (2.5 millones lo hicieron en el Hajj 2019). En numerosas oportunidades ocurrieron catástrofes provocadas por estampidas entre los peregrinos, que provocaron que varias personas murieran aplastadas o asfixiadas: en 1990 (con 1.426 muertos), en 1994 (270 muertos), en 1997 (340 muertos), en 1998 (180 muertos), en 2001 (35 muertos), 2004 (244 muertos), 2006 (350 muertos) y la última en 2015 (más de 2000 muertos) [21].

Aunque se ha logrado medir el diagrama fundamental con datos empíricos del Puente de Jamarat [18], el SFM original (tal como fue propuesto por Helbing *et al.* en el 2000 [10]) no puede reproducir el comportamiento cualitativo del régimen congestionado. Sin embargo, con una modificación en los coeficientes de la fricción, Sticco *et al.* han obtenido un diagrama fundamental que se asemeja al medido experimentalmente [19].

En los últimos años, diversos autores remarcan que además de considerarse los comportamientos individuales deben considerarse correlaciones de orden superior (comportamientos colectivos), correspondientes a grupos sociales dentro de la multitud, como por ejemplo amigos o familiares. Para eso, se han planteado modificaciones al SFM para reproducir fenómenos observados en sistemas con distintos niveles de pánico o densidades. En algunos casos se tiene en cuenta el ángulo de visión de las personas, que afecta a la formación de patrones en bajas densidades [22, 23], la distancia entre los individuos y el centro de masa del grupo [24], incluso los modelos más complejos consideran la existencia de un líder a quien el resto de las personas del mismo grupo siguen [25]. Algunos autores realizaron experimentos de evacuaciones controladas, asignando a cada persona un grupo del cual debe intentar no separarse [26]. En todos los casos se observan cambios en la dinámica producidos por la presencia de grupos sociales.

En este trabajo se utilizará la fuerza de atracción introducida en el trabajo de Frank y Dorso [27], en el que se define a un grupo por medio de esta fuerza afectiva que atrae a determinados individuos entre sí. El foco principal de este trabajo está puesto en los grupos de dos personas, por lo que no se considerará el tiempo que toma un grupo más grande en tomar decisiones afectados por el pánico, o los patrones espaciales que se forman en bajas densidades (como por ejemplo en una calle o en un centro comercial).

Añadiendo dicha fuerza de atracción al modelo, se profundizará en el estudio de la dinámica de multitudes con presencia de grupos sociales. Se investigará cómo cambia la dinámica de las evacuaciones de emergencia y cómo se modifica el diagrama fundamental al considerar distintos tipos de grupos. Por otra parte, se ha sugerido que considerar las inhomogeneidades que están presentes dentro de una multitud real puede ser una clave para reproducir cualitativamente el diagrama fundamental [28]. En ese sentido, considerar la existencia de grupos sociales en el marco del SFM puede contribuir a obtener un flujo de individuos que se asemeje al medido empíricamente. Además, considerar simultáneamente el aumento de la fricción y la presencia de grupos es una alternativa que aún no ha sido explorada (hasta donde se tiene conocimiento al momento de hacer este trabajo).

1.1. Objetivos de la tesis

En esta investigación se analizarán los efectos de considerar la existencia de grupos sociales (o *clusters sociales*) en la dinámica peatonal. En particular, se analizará cómo afectan a la dinámica de las evacuaciones en estado de pánico, con una única salida de emergencia y sin obstáculos en el recinto a evacuar. Además, se estudiará el caso de emergencia en un pasillo con alta congestión de individuos, se lo vinculará con el diagrama fundamental y se observará cómo se modifica el mismo debido a la presencia de grupos sociales.

El objetivo de esta tesis es complementario a la investigación realizada por Frank y Dorso [27]. Se considerarán las mismas hipótesis de trabajo, se las contrastará con nueva evidencia experimental, y se extenderá el análisis de evacuaciones de emergencia a un rango más amplio de niveles de ansiedad de los grupos de individuos.

En el capítulo 2 se introducirá el marco teórico. Se explicará en qué consiste el Modelo de Fuerza Social (SFM) original, y se detallarán las modificaciones realizadas para dar cuenta de la existencia de grupos dentro de una multitud. Además se definirán algunos conceptos centrales de la dinámica peatonal.

En el capítulo 3 se comentarán datos empíricos y resultados ya conocidos dentro de la dinámica peatonal, que constituyen una base y un punto de partida de este trabajo.

En el capítulo 4 se detallará cómo se llevaron a cabo las simulaciones. Se comentarán los parámetros y las configuraciones empleadas.

En el capítulo 5 se mostrarán y discutirán los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales. Por último, en el capítulo 6 se presentarán las conclusiones finales de este trabajo.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. El Modelo de Fuerza Social (SFM)

En el Modelo de Fuerza Social de Helbing *et al.* [10], las personas se representan como partículas auto-propulsadas. Las interacciones sociales se dan por medio de fuerzas socio-psicológicas y fuerzas físicas, basadas en comportamientos sociales observados empíricamente.

La intención de cada individuo de moverse a una velocidad deseada se manifiesta a través de una fuerza de deseo, que es una fuerza proporcional a la aceleración requerida para alcanzar esta velocidad deseada (v_d), y de moverse en la dirección deseada ($\hat{\mathbf{e}}_d$). La magnitud de v_d varía según el nivel de ansiedad de los individuos: no es la misma velocidad la que se desea tener caminando por una calle que la que se desea en una evacuación de emergencia, por ejemplo. Existen diversas causas por las que un individuo podría no moverse a la velocidad deseada: al transitar por un lugar congestionado, con visibilidad reducida, con obstáculos, etcétera. La fuerza de deseo incluso puede ser negativa si un individuo tiene una velocidad mayor que la deseada (al ser empujado, por ejemplo). Por lo tanto, si en un tiempo t su velocidad actual $\mathbf{v}(t)$ no coincide con su velocidad deseada v_d , se acelerará (o desacelerará) para alcanzarla.

La fuerza de deseo de un individuo i en un determinado instante t tiene la forma

$$\mathbf{F}_d^{(i)}(t) = m_i \frac{v_d^{(i)}(t) \hat{\mathbf{e}}_d^{(i)}(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau} \quad (2.1)$$

siendo $\mathbf{v}_i(t)$ su velocidad actual y m_i su masa. τ es el tiempo de relajación del individuo, que es un parámetro fijo del modelo y se estima a partir de observaciones experimentales.

Los individuos presentan una fuerza de repulsión social. Esta fuerza representa la tendencia natural de los peatones a estar alejados unos de otros y de conservar su privacidad personal.

Para evitar que dos personas se aproximen más allá de sus respectivas “esferas de privacidad”, la intensidad de la repulsión aumentará cuanto más cerca se encuentren. Su forma precisa es

$$\mathbf{F}_s^{(ij)} = A_i e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i} \mathbf{n}_{ij} \quad (2.2)$$

donde i y j representan a dos individuos, d_{ij} representa la distancia entre sus centros de masa, \mathbf{n}_{ij} es el versor en la dirección \overrightarrow{ji} (de j hacia i) y $r_{ij} = R_i + R_j$ es la suma de los radios de los peatones i y j (refiriéndose al semi-ancho de hombros). A_i representa la intensidad de la fuerza cuando los individuos están a distancia de contacto ($d_{ij} = r_{ij}$) y B_i la distancia característica de la misma, siendo ambos parámetros del modelo. El gráfico de la fuerza social se puede ver en la figura 2.1.

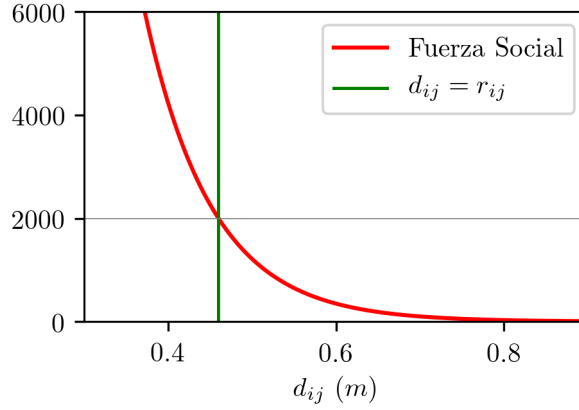


Figura 2.1: Gráfico de la fuerza social con $A=2000$ N, $B=0.08$ m, y $r_{ij}=0.46$ m.

Cuando una persona entra en contacto con otra, aparece una fuerza de rozamiento que dificulta el movimiento de los mismos. Su expresión es de la forma

$$\mathbf{F}_r^{(ij)} = \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) (\Delta \mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{t}}_{ij}) \hat{\mathbf{t}}_{ij} \quad (2.3)$$

donde $\Delta \mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i$ es la diferencia de velocidad entre los peatones i y j , y $\hat{\mathbf{t}}_{ij}$ es el versor tangencial (perpendicular a la dirección que los une \mathbf{n}_{ij}). κ es un parámetro experimental y $g(x)$ es una función nula si $x < 0$ o igual a su argumento en caso contrario, lo que asegura la presencia de la fricción sólo al entrar en contacto ($d_{ij} < r_{ij}$). En resumen, la fuerza de rozamiento depende linealmente de la distancia y de la diferencia entre las velocidades tangenciales de los peatones, y actúa en la dirección tangencial a los mismos.

Por otra parte, los individuos interactúan con las paredes y obstáculos de manera similar. La tendencia de mantener una cierta distancia con éstos provoca una fuerza social como la de

la ecuación 2.2, en la que se reemplaza d_{ij} por d_{iW} (la distancia entre el individuo y la pared u obstáculo), y \mathbf{n}_{ij} por \mathbf{n}_{iW} (la dirección perpendicular a la pared u obstáculo).

Así mismo, al entrar en contacto con una pared o un obstáculo, el rozamiento causado dificulta el movimiento. En este caso, en la expresión 2.3 se reemplaza \mathbf{t}_{ij} por \mathbf{t}_{iW} (la dirección tangencial a la pared), y $\Delta\mathbf{v}_{ij}$ por \mathbf{v}_i ($\mathbf{v}_W = 0$ ya que la pared está fija).

Todas estas fuerzas operan sobre la dinámica de cada individuo siguiendo una ecuación de movimiento de Newton

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt}(t) = \mathbf{F}_d^{(i)}(t) + \sum_j \mathbf{F}_s^{(ij)}(t) + \sum_j \mathbf{F}_r^{(ij)}(t) \quad (2.4)$$

donde i representa a un individuo y j a otro individuo, o bien a una pared u obstáculo.

En la figura 2.2 se muestra en un esquema cómo actúan las fuerzas del SFM sobre un individuo en movimiento que está en contacto con dos individuos en reposo. Se muestra la fuerza de deseo \mathbf{F}_d (Ec. 2.1), la fuerza social \mathbf{F}_s (Ec. 2.2) que va en la dirección que une a los centros de masa de los individuos, y la fuerza de rozamiento \mathbf{F}_r (Ec. 2.3) que está presente ya que se encuentran en contacto y tienen velocidades distintas.

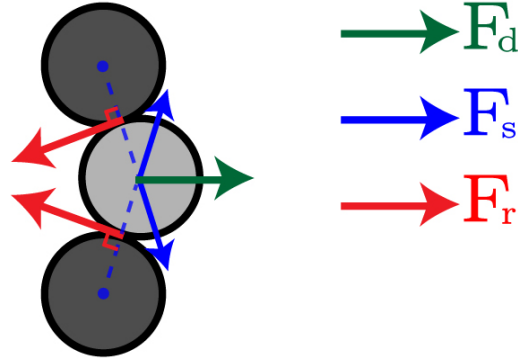


Figura 2.2: Esquema de las fuerzas del modelo de fuerza social actuando sobre un individuo. Se muestra la fuerza de deseo (en verde) que apunta hacia la derecha, la fuerza social (en azul) que apunta en la dirección que une a los centros de masa de los individuos (\mathbf{n}_{ij}), y la fuerza de rozamiento (en rojo) que va en la dirección tangencial (\mathbf{t}_{ij}). Sólo se muestran las fuerzas que actúan sobre el individuo representado en gris claro, que se encuentra en movimiento. Los individuos representados con color gris oscuro permanecen en reposo.

2.2. Fuerza de atracción

Cuando un grupo social de personas (una pareja, una familia, un grupo de colegas) mantienen un lazo afectivo, éste se manifiesta por una cierta distancia que mantienen entre sí, que es menor

a la que se mantiene con desconocidos. Dependiendo el tipo de relación que compartan, tolerarán en mayor o menor medida compartir su “esfera de la privacidad”. La distancia entre ellos será el resultado del balance entre los sentimientos afectivos y la tendencia natural a separarse, representada por la fuerza social (Ec. 2.2). Más allá de cierta distancia de separación máxima, es de esperar que el lazo afectivo dejará de estar presente debido a que una persona del grupo perderá noción de dónde se encuentra otra.

La fuerza de atracción propuesta por Frank y Dorso [27] se define a través de un potencial de Fermi, que cumple con los requisitos mencionados, y es de la forma

$$U_a^{(ij)}(d_{ij}) = -\epsilon \left[1 + e^{(d_{ij}-C_i)/D_i} \right]^{-1} \quad (2.5)$$

y su respectiva fuerza $-\nabla U_a$ es

$$\mathbf{F}_a^{(ij)} = -\frac{\epsilon}{4D_i} \cosh^{-2} \left(\frac{C_i - d_{ij}}{2D_i} \right) \mathbf{n}_{ij} \quad (2.6)$$

en donde ϵ es la intensidad de la atracción, y representará distintos niveles de afectividad entre individuos. C_i es el centro del pozo y D_i está relacionado con el alcance de la interacción. El gráfico del potencial y la fuerza de atracción se puede ver en la figura 2.3.

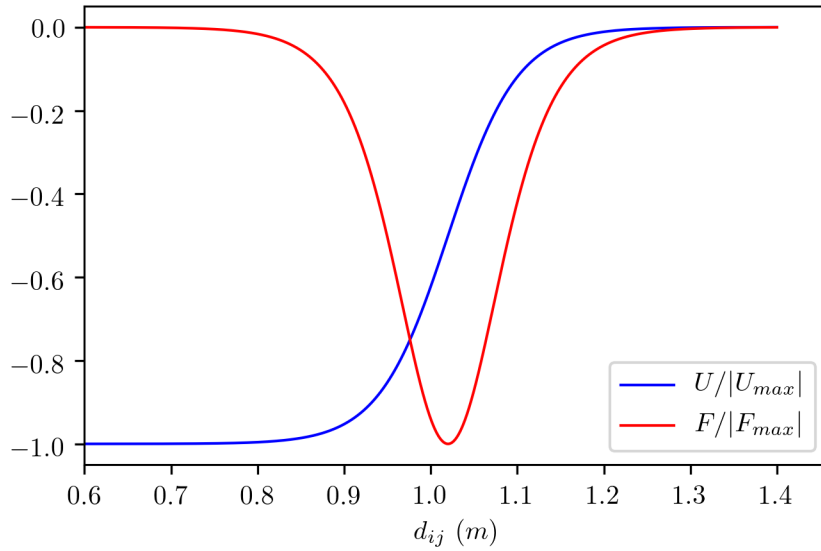


Figura 2.3: Gráfico del potencial y la fuerza de atracción con $C = 1.16$ m y $D = 0.04$ m.

Para relacionar los parámetros C_i y D_i a los parámetros del SFM, puede compararse la ecuación de la fuerza social (Ec. 2.2) con la fuerza de atracción (Ec. 2.6) y ver que las distancias características de las fuerzas son B_i y $2D_i$ respectivamente. Suponiendo que las fuerzas tienen el mismo alcance característico, entonces $D_i = B_i/2$. Cuando $d_{ij} = C_i$, la fuerza atractiva

alcanza su mayor magnitud (en módulo). Entonces, se fija el valor del centro del pozo como $C_i = r_{ij} + 7B_i$, que es aproximadamente $2r_{ij}$.

Finalmente, la fuerza de atracción entre i y j $\mathbf{F}_a^{(ij)}$ se sumará a la ecuación de movimiento del SFM (Ec. 2.4) de la misma manera que la fuerza social $\mathbf{F}_s^{(ij)}$.

2.3. *Blocking Cluster*

Una de las principales características en la dinámica peatonal es la formación de agrupamientos de personas o “*clusters*” sociales (que no implica que sean grupos afectivos). Los *clusters* pueden definirse como un conjunto de individuos tales que para cualquier miembro del grupo (i), existe otro integrante (j) del mismo grupo en contacto con el primero. Entonces, la definición matemática del “**cluster granular**” (C_g) es [13]

$$C_g : P_i \in C_g \Leftrightarrow \exists P_j \in C_g / d_{ij} < r_{ij} \quad (2.7)$$

donde P_i es la persona i , y $r_{ij} = R_i + R_j$ es la suma de los radios de las personas i y j (refiriéndose al ancho cuello-hombro). En otras palabras, C_g es un conjunto de individuos que están en contacto y por lo tanto interactúan entre sí no sólo a través de fuerzas sociales, sino que también lo hacen por medio de la fuerza de rozamiento (Ec. 2.3).

Cuando en el contexto de una evacuación un *cluster* bloquea totalmente una salida, se lo denomina “**blocking cluster**”. Esto sucede cuando un integrante del *cluster* toca una de las paredes que delimitan la puerta, otro integrante del mismo toca la otra y permanecen en contacto por una cierta cantidad de tiempo. Un ejemplo de *blocking cluster* se muestra en la figura 2.4.

En general, en una evacuación en donde el nivel de ansiedad es elevado, el tiempo que tardan en salir los individuos aumenta principalmente debido a la presencia de *blocking clusters* [13, 14, 29, 30]. Por lo tanto, el estudio sobre la formación, la duración y la morfología de los *clusters* es fundamental para entender la dinámica en una evacuación.

2.4. Diagrama Fundamental

El diagrama fundamental de la dinámica peatonal relaciona la densidad de peatones ρ (Personas/m²) y el flujo de los mismos $\mathbf{J} = \rho\mathbf{V}$. En el trabajo de Helbing *et al.* [18], se logra medir, analizando filmaciones, la densidad y la velocidad en regiones localizadas del espacio.

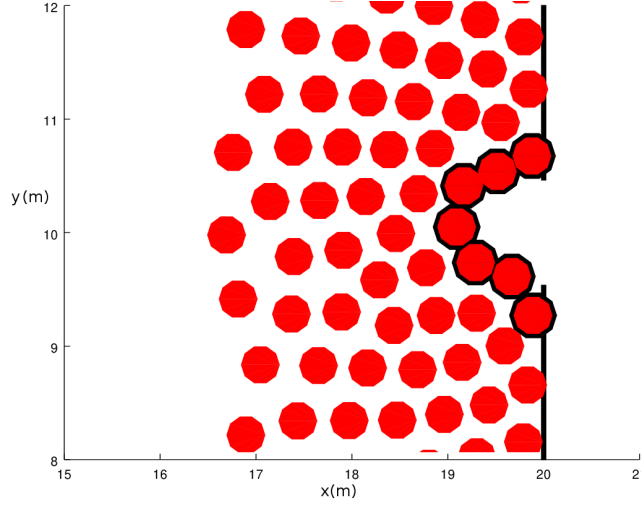


Figura 2.4: Ejemplo de *blocking cluster* generado en una evacuación. Los círculos rojos representan a los individuos, mientras que los rebordes negros señalan a los integrantes del *cluster*. Como uno de ellos toca la pared superior a la puerta y otro toca la pared inferior, éste es un *blocking cluster*.

Para eso, la densidad $\rho(\vec{r}, t)$ fue definida como

$$\rho(\vec{r}, t) = \sum_j f(\vec{r}_j(t) - \vec{r}) \quad (2.8)$$

en donde $\vec{r}_j(t)$ es la posición del individuo j en el tiempo t , y f es una función de peso gaussiana, definida como

$$f(\vec{r}_j(t) - \vec{r}) = \frac{1}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{\|\vec{r}_j(t) - \vec{r}\|^2}{R^2}\right)$$

en donde R representa el radio de la región sobre la cual se realizan las mediciones, como se muestra en la figura 2.5.

La velocidad local $V(\vec{r}, t)$ fue definida en [18] como

$$\vec{V}(\vec{r}, t) = \frac{\sum_j \vec{v}_j(t) f(\vec{r}_j(t) - \vec{r})}{\sum_j f(\vec{r}_j(t) - \vec{r})} \quad (2.9)$$

Por último, el flujo fue definido como

$$\vec{J}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \vec{V}(\vec{r}, t) \quad (2.10)$$

En esta tesis, la densidad considerada fue la densidad global del pasillo. Al tener la capacidad de conocer exactamente la posición del centro de masa de cada individuo en las simulaciones, la velocidad local en la región fue medida de una manera más directa, calculando el promedio

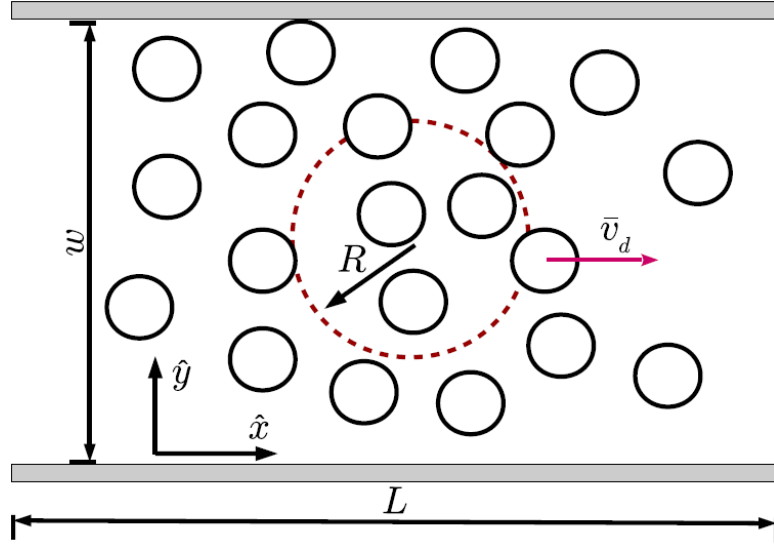


Figura 2.5: Diagrama de un pasillo en el que se mide la densidad y la velocidad. Los círculos representan a individuos que se mueven hacia la derecha. w y L son las dimensiones del pasillo, y el círculo de radio R es la región en la que se realizarán las mediciones de densidad y velocidad.

de la velocidad de los individuos en la región en la que se mide. Escrito de manera análoga a las definiciones anteriores, si la región sobre la que se midió es R entonces

$$\vec{V}(t) = \frac{\sum_{j \in R} \vec{v}_j(t)}{\sum_{j \in R} 1} \quad (2.11)$$

Se verificó que esta forma de obtener la densidad y velocidad no cambia significativamente los resultados obtenidos [19].

Capítulo 3

Datos experimentales y resultados previos

En este capítulo se presentarán resultados de la literatura que serán relevantes en el contexto de este trabajo. En primer lugar, se resumirán algunos resultados conocidos sobre el tiempo que tarda una evacuación de emergencia. En segundo lugar, la distancia que hay entre un grupo de personas dependiendo de su relación afectiva, según se midió experimentalmente en un centro comercial. Por último, se comentará el diagrama fundamental medido experimentalmente en el Puente de Jamarat.

3.1. Tiempo de evacuación sin presencia de grupos

En el estudio de las evacuaciones de emergencia, una de las magnitudes más relevantes es el tiempo que tardan los individuos en evacuar. Éste varía en función del nivel de ansiedad de los evacuados, caracterizado por la velocidad de deseo (v_d) [13]. En la figura 3.1 se presenta el tiempo de evacuación en función de v_d utilizando el SFM original. A modo de ejemplo, la situación mostrada en la figura 2.4 corresponde a un instante de una evacuación.

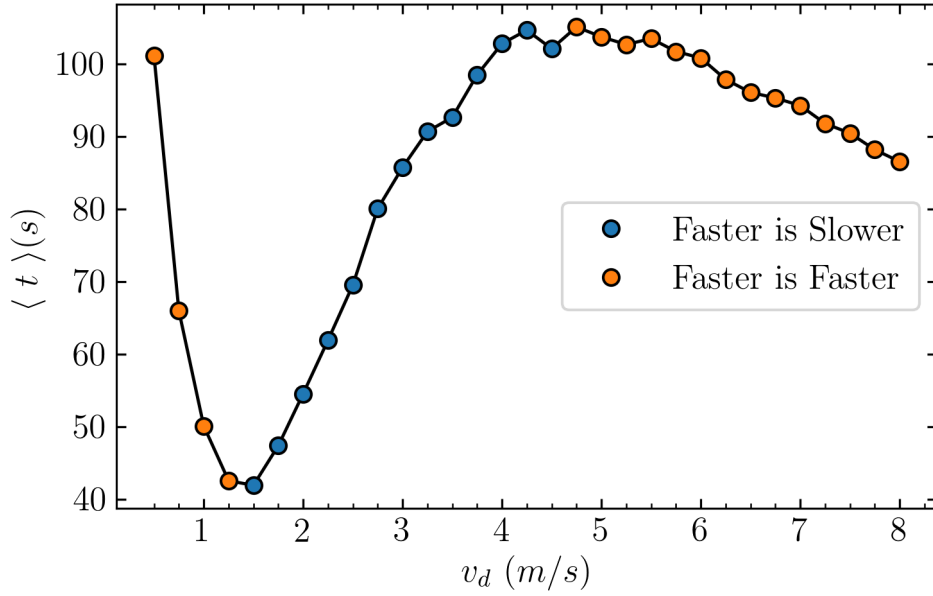


Figura 3.1: Tiempo de evacuación sin considerar la existencia de grupos sociales en la multitud. Las simulaciones se realizaron en un recinto de 20 m x 20 m, con una puerta de 0.92 m ubicada en el centro de una de las paredes. Inicialmente hay 225 individuos a evacuar. La simulación termina cuando el 70 % de los individuos se encuentran evacuados. Todos los individuos tienen la misma v_d . Cada uno de los tiempos graficados corresponde al promedio de 30 simulaciones con diferentes condiciones iniciales.

La característica principal de esta curva es que se divide en tres regímenes distintos:

- Para $v_d < 1.25$ m/s, el tiempo de evacuación disminuye al aumentar v_d . Esto se debe a que por el bajo nivel de ansiedad, las personas no se amontonan frente a la salida, no entran en contacto y no se produce fricción entre ellos. De esta manera, no se produce una cantidad significativa de *blocking clusters*, que son la principal causa de entorpecimiento de una evacuación [13]. Por lo tanto, al aumentar v_d se reduce el tiempo de la evacuación, por lo que este comportamiento es conocido como *Faster is Faster* (más rápido es más rápido).
- Para 1.25 m/s $< v_d < 5$ m/s (aproximadamente) el tiempo de evacuación se incrementa al aumentar v_d . En este caso, al aumentar el nivel de ansiedad, los individuos se amontonan en mayor medida frente a la salida del recinto, entran en contacto y por esta razón la fuerza de fricción se vuelve significativa. Esto favorece la generación de *blocking clusters* en la cercanía de la salida. Los mismos juegan un rol fundamental en el retraso de la evacuación [13]. Este efecto es conocido como *Faster is Slower* (más rápido es más lento) [10, 13].
- Para $v_d > 5$ m/s el tiempo de evacuación disminuye al aumentar v_d . Esto se debe a que la presión en la multitud logra romper los *blocking clusters* cercanos a la salida. Sin embargo,

como la ansiedad es tan alta, toda la multitud entra en contacto y forma un *cluster* gigante, donde la dinámica de salida está dominada por la presión extremadamente alta dentro de la multitud [30]. Este efecto, aunque se dé por comportamientos dinámicos radicalmente distintos a los del primer régimen, es conocido igualmente como *Faster is Faster* [29]. Por otra parte, es muy posible que se produzcan muertes por asfixia u otro tipo de daños debido a las presiones extremadamente altas que se generan en las cercanías de la salida [7].

Partiendo de este resultado, en la sección 5.2 se analizará cómo afecta al tiempo de evacuación el hecho de considerar la existencia de grupos sociales dentro de la multitud.

3.2. Distancia entre grupos de dos personas (dúos)

En los trabajos de Zanolungo *et al.* [31, 32, 33], se midieron determinados observables para relacionarlos con el nivel de afecto o el tipo de relación de un grupo de dos personas (dúo). La distancia a la que caminan dichas personas, la diferencia de alturas y la velocidad media del grupo fueron algunos de los observables medidos. Uno de sus objetivos principales consistió en identificar y separar a los grupos, a partir de los observables, dentro de 4 categorías: *colegas*, *familia*, *parejas afectivas* o *amigos*.

Los datos experimentales fueron medidos a lo largo de un año en el centro comercial “The Asia and Pacific Trade Center”, en el puerto de Osaka. Para hacerlo se instalaron cámaras y sensores de movimiento en distintos pasillos, y luego se vio grupo por grupo a qué “categoría afectiva” corresponde según el criterio de los calificadores (la fiabilidad de los resultados está asegurada por la coincidencia de los reportes entre distintos calificadores). Las densidades medidas variaron por debajo de 0.4 P/m^2 (personas por m^2).

De los observables mencionados, el más relevante para este trabajo es la distancia entre las personas de un mismo grupo, que se puede observar en la figura 3.2.

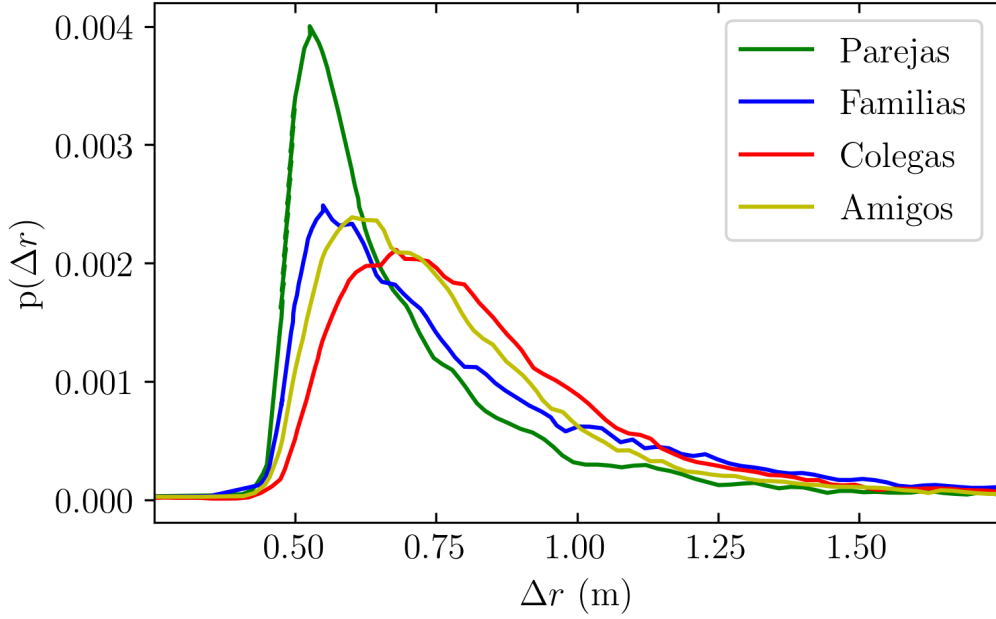


Figura 3.2: Distribución de las distancias interpersonales entre grupos de dos personas medida experimentalmente en un centro comercial. Cada curva corresponde al tipo de relación entre las personas.

Como se observa en el gráfico, la distancia entre personas del mismo grupo depende del tipo de relación afectiva que posean. En particular, la distancia entre *parejas afectivas* es significativamente menor que en el resto de las categorías afectivas. Entre las otras tres categorías, la distancia entre miembros de una *familia* es menor, seguido por la distancia entre *amigos*, y por último los *colegas* tienen una distancia mayor.

Teniendo en cuenta estas mediciones, se realizarán simulaciones computacionales emulando las condiciones de los pasillos del centro comercial filmado. Se variará la intensidad de la fuerza de atracción entre los grupos (introducida en la sección 2.2), se observará cómo varían las distancias entre los individuos de un grupo y se compararán con las distancias medidas experimentalmente.

3.3. Diagrama fundamental en el Puente de Jamarat

Entre el 31 de diciembre 2006 y el 1 de enero 2007, durante la peregrinación a la Meca, se logró medir la velocidad y la densidad localmente en la entrada del Puente de Jamarat. Esto se logró a través de filmaciones [18], siguiendo los pasos que se explican en la sección 2.4. El diagrama obtenido por Helbing *et al.* en la entrada del puente de Jamarat (que puede ser considerado como un pasillo de 22 m de ancho) luego de medir $\rho(\vec{r}, t)$ y $\vec{V}(\vec{r}, t)$ en distintas regiones y en distintos instantes de tiempo, se puede observar en la figura 3.3.

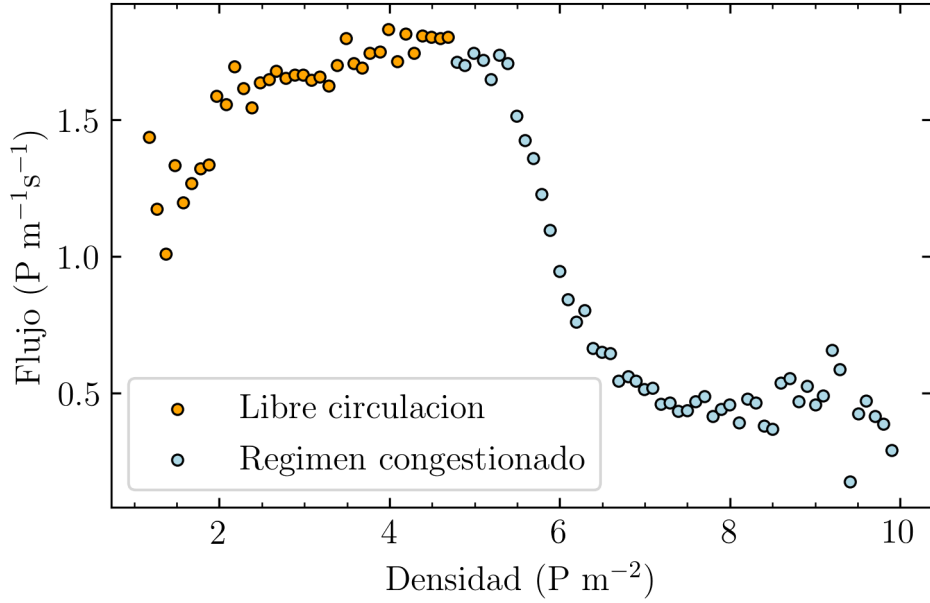


Figura 3.3: Diagrama fundamental medido en el Puente de Jamarat en Mina, que tiene un ancho de 22 m. Las mediciones corresponden al 30 de diciembre de 2006 y 1º de enero de 2007, durante la peregrinación a La Meca.

El diagrama fundamental se divide en dos regímenes, separados por una densidad umbral ($\rho \simeq 4.5 \text{ P/m}^2$ en este caso). En el régimen de libre circulación, para densidades menores al umbral, el flujo aumenta con la densidad. Por el contrario, para densidades mayores al umbral, el sistema se encuentra congestionado y los peatones presumiblemente entran en contacto. Al aumentar la cantidad de peatones en contacto se incrementa la fricción y se observa una consiguiente reducción del flujo.

Como se mencionó en la introducción, las simulaciones realizadas empleando el SFM básico con los parámetros originales no han sido capaces de reproducir los comportamientos distintivos del régimen congestionado. Por ejemplo, no se ha podido obtener la reducción drástica del flujo y el estancamiento del mismo por debajo del observado en el régimen de libre circulación. Distintas modificaciones se han propuesto para lograr reproducir el diagrama fundamental empírico. Entre ellas, modificar el coeficiente de rozamiento multiplicándolo por 5 es una de las opciones que mejores resultados ha dado [19]. En la figura 3.4 se compara el diagrama obtenido con el coeficiente original y con el aumentado.

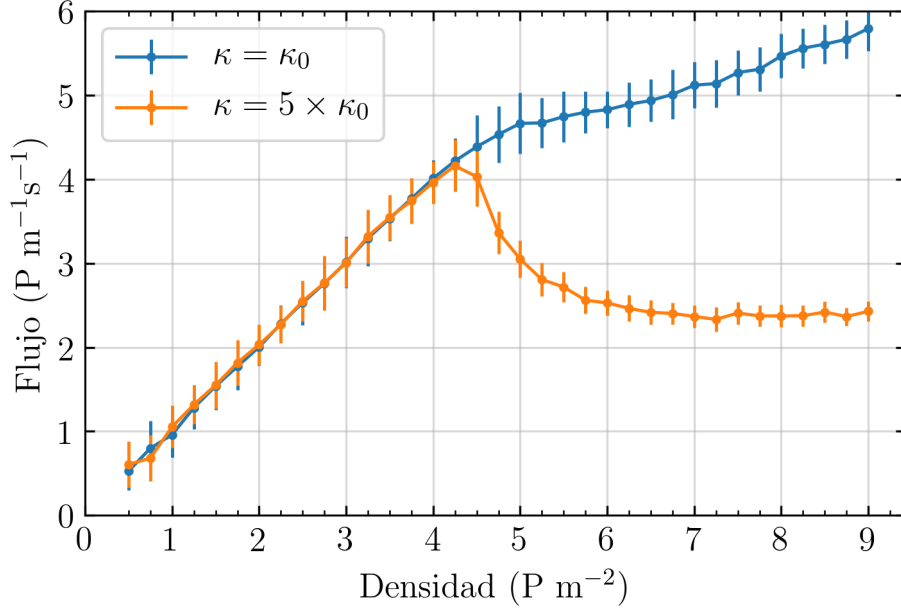


Figura 3.4: Diagrama fundamental proveniente de simulaciones que emplean el SFM sin considerar la existencia de grupos en la multitud, con el coeficiente de fricción original del modelo ($\kappa_0 = 2.4 \cdot 10^5 \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) y el quintuplicado ($5 \times \kappa_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$). El recinto de las simulaciones es un pasillo de 22 m de ancho, y 28 m de largo con condiciones periódicas de contorno. La velocidad de deseo para todos los individuos es $v_d = 1 \text{ m/s}$.

Con los parámetros originales del modelo, el flujo de individuos sigue creciendo aunque a un ritmo menor en el régimen congestionado. Al aumentar el coeficiente de fricción, el mayor rozamiento provoca una disminución abrupta del flujo en el régimen congestionado, lo que coincide cualitativamente con el diagrama experimental de la figura 3.3. En otras palabras, en situaciones de congestiones y densidades extremadamente altas, el coeficiente de fricción original no refleja una disminución de velocidades realista.

Teniendo en cuenta esta modificación del parámetro de fricción, se analizará cómo se modifica el diagrama por la presencia de grupos sociales. En particular se verá si el flujo se ve disminuido, en cuyo caso sería un paso más en el camino de reproducir el diagrama fundamental medido experimentalmente.

Capítulo 4

Simulaciones computacionales

En este capítulo se detallarán los parámetros utilizados para el SFM, la geometría de los recintos en los que se realizan las simulaciones y la generación de las condiciones iniciales en cada caso.

Las personas son representadas por esferas compresibles de masa fija, en las cuales su diámetro representa el ancho promedio entre hombros. Todas las fuerzas actúan sobre el centro de masa de cada persona.

Las simulaciones se realizaron con el software **LAMMPS** (*Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator*)[34], con módulos adicionales escritos en C++ capaces de evaluar las fuerzas del SFM.

La programación de distintos módulos fue necesaria para añadir la fuerza de atracción al SFM en distintos contextos. Al simular una evacuación, la fuerza de atracción entre dos personas se tiene en cuenta únicamente si ambos están dentro del recinto a evacuar.

Las ecuaciones de movimiento del SFM (Ec. 2.4) fueron integradas a través del algoritmo de Verlet (en velocidades) y con un tiempo de integración de 10^{-4} s.

4.1. Parámetros del modelo

En este trabajo se utilizaron los parámetros del SFM original [10]: $A=2000$ N, $B=0.08$ m, $\kappa = 2.4 \cdot 10^5 \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y $\tau=0.5$ s. La masa de las personas se fijó en 70 Kg, y el diámetro en 0.46 m que corresponde al ancho promedio entre hombros aceptado en la literatura [35]. En consecuencia, los parámetros de la fuerza de atracción introducida en la sección 2.2 son $C=1.16$ m y $D=0.04$ m.

En la sección 5.5, en la que se estudia el diagrama fundamental, el coeficiente de fricción

utilizado será $\kappa = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, es decir el quintuple de la magnitud mencionada anteriormente. Esto se debe a que, como se explica en la sección 3.3, con este coeficiente de fricción se logra reproducir cualitativamente el diagrama fundamental medido experimentalmente.

El nivel de ansiedad de los individuos, representado por v_d , así como el nivel afectivo representado por la intensidad de la atracción ϵ son las variables de control en las simulaciones. Dado el amplio rango que toma ϵ , frecuentemente se mostrarán los resultados en función de $\log_{10} \epsilon$.

4.2. Geometría de los recintos y configuraciones de las simulaciones

Las simulaciones en la sección 5.1 reproducirán las condiciones en las que Zangluno *et al.* realizaron las mediciones comentadas en la sección 3.2. La densidad fue fijada en $\rho = 0.4 \text{ P/m}^2$ (personas por m^2), correspondiente a la medida por ellos [32]. El pasillo simulado es de $L = 50 \text{ m}$ de largo y $w = 25 \text{ m}$ de ancho, con condiciones de contorno periódicas. En otras palabras, cuando un individuo llega a $x = L$, éste es re-ubicado en $x = 0$ con la misma velocidad y misma coordenada y , emulando así un pasillo semi-infinito.

Dadas las dimensiones del pasillo y la densidad, se simularon 500 personas en total. Entre ellas, el 70 % formó parte de un dúo. En cada simulación se varió ϵ , el cual es igual para todos los dúos. Las mediciones se tomaron a los 50 segundos del comienzo de la simulación, tiempo suficiente para que cada dúo de personas encuentre la distancia de separación de equilibrio (ver Apéndice A). Como la velocidad medida fue de $\simeq 1 \text{ m/s}$ en promedio, y teniendo en cuenta que en bajas densidades los individuos transitan aproximadamente con su velocidad deseada, se fijó $v_d = 1 \text{ m/s}$. La dirección deseada de movimiento $\hat{\mathbf{e}}_d$ apunta de izquierda a derecha, en el sentido del pasillo, como se muestra en la figura 2.5.

En las secciones 5.2 y 5.4, en cambio, las simulaciones de evacuaciones de emergencia se realizaron en recintos cuadrados de lado $L=20 \text{ m}$, con 225 personas en el mismo inicialmente. El recinto contiene una única salida de 0.92 m de largo, equivalente al diámetro de dos personas, ubicada en el centro de uno de los bordes del mismo.

Se estudiaron los casos en los que el 25 % y el 100 % de las personas se encuentra en dúos, de igual manera que en el trabajo original de Frank y Dorso [27]. En cada simulación todos los dúos se atraen con igual intensidad (mismo ϵ). Asimismo, en cada simulación todos los individuos poseen el mismo nivel de ansiedad (misma v_d). En otras palabras, cada simulación está caracterizada por una v_d y un ϵ . La dirección deseada de movimiento $\mathbf{e}_d^{(i)}$ apunta en cada instante al punto más cercano de la salida, considerando el efecto de paralaje respecto de los

bordes de la puerta.

La simulación termina cuando 160 personas logran evacuar ($\sim 70\%$ del total), y el tiempo en el que eso ocurre es definido como el tiempo que tardó la evacuación. Para cada valor de ϵ y v_d , se realizaron 100 simulaciones variando las condiciones iniciales. Todos los observables corresponden a promedios sobre las 100 realizaciones, salvo que se indique explícitamente lo contrario.

Por último, en la sección 5.5, correspondiente al estudio del diagrama fundamental con presencia de grupos sociales, las simulaciones se realizaron en un pasillo de ancho $w = 22$ m, de acuerdo al ancho de la entrada del Puente de Jamarat (ver sección 3.3). El largo del pasillo se fijó en $L = 28$ m, con condiciones de contorno periódicas que emulan un pasillo semi-infinito ($L \gg w$).

Se hicieron simulaciones variando la densidad global entre 0.5 y 9 P/m², y la cantidad de grupos fue ajustada en cada caso de manera tal que el 70% del total de los individuos forme parte de un grupo. Tras dejar pasar 20 segundos de simulación, se midió cada 0.5 segundos la velocidad de los peatones en una región circular de 1 m de radio en el centro del pasillo (ver figura 2.5). Se fijó $v_d=1$ m/s en todas las simulaciones, que corresponde a situaciones sin presencia de pánico, como las observadas en las filmaciones del puente de Jamarat [18].

4.3. Condiciones iniciales

En todos los casos, inicialmente los individuos se encuentran distribuidos de manera aleatoria en el recinto, con la salvedad de que los integrantes de cada grupo comienzan a una distancia de entre 40 y 70 cm entre sí en un ángulo aleatorio. Luego de un tiempo despreciable frente a la duración de la simulación, alcanzan una distancia de equilibrio (ver Apéndice A). Las velocidades iniciales de todos los individuos son asignadas de manera aleatoria a partir de una distribución Gaussiana con valor medio nulo.

En la figura 4.1 se observa un ejemplo de condiciones iniciales en una evacuación. También se muestra la dirección deseada de movimiento de algunos individuos como referencia.

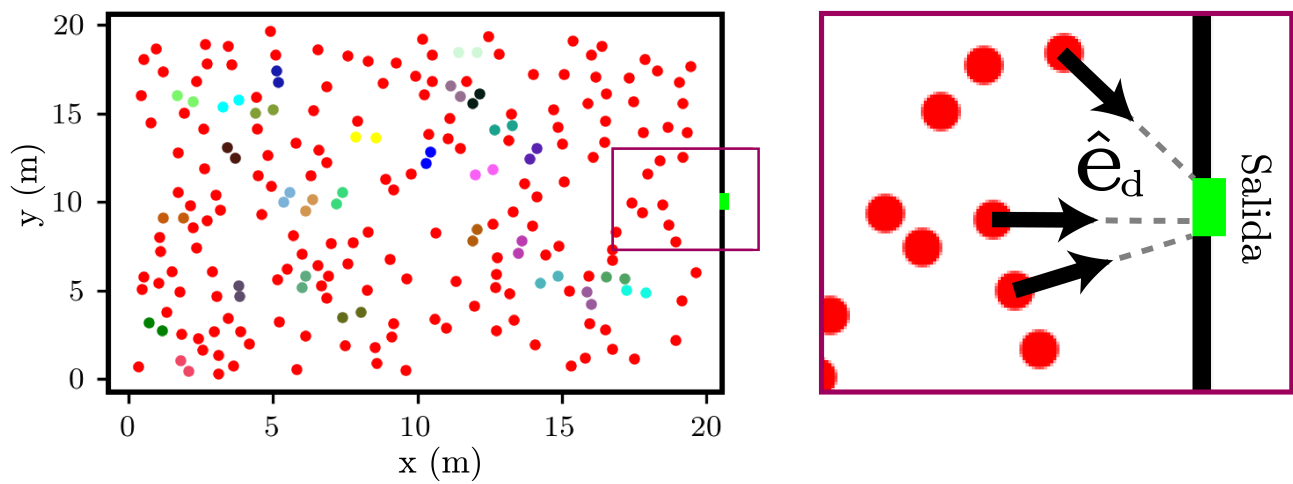


Figura 4.1: Configuración inicial de 225 personas en un recinto de 20 m x 20 m. El 25 % de las personas forma parte de dúos, y cada color representa un dúo distinto. Los individuos representados con color rojo no forman parte de ninguno de ellos. También se muestra para algunos individuos la dirección deseada de movimiento $\hat{e}_d^{(i)}$, que es hacia el punto más cercano de la puerta de salida.

Capítulo 5

Resultados

Los resultados se dividen en tres partes. En primer lugar, la calibración de la fuerza de atracción para tener una noción concreta del rol de la intensidad afectiva ϵ . Luego, la utilización de la fuerza calibrada para estudiar cómo se modifican las evacuaciones de emergencia por la presencia de grupos sociales. Por último, el estudio del diagrama fundamental y cómo se altera debido a los grupos sociales en la multitud.

5.1. Calibración de la fuerza de atracción

Para establecer una conexión entre la intensidad ϵ de la fuerza de atracción (Ecs. 2.5 y 2.6) y los datos empíricos, se realizaron simulaciones en las condiciones comentadas en la sección 3.2.

En cada simulación se fijó un mismo ϵ para todos los dúos. Tras 50 segundos de simulación, se midió la distancia de separación entre cada par de individuos que componen un dúo. En la figura 5.1 se muestra como ejemplo el estado de una simulación al momento de realizar la medición.

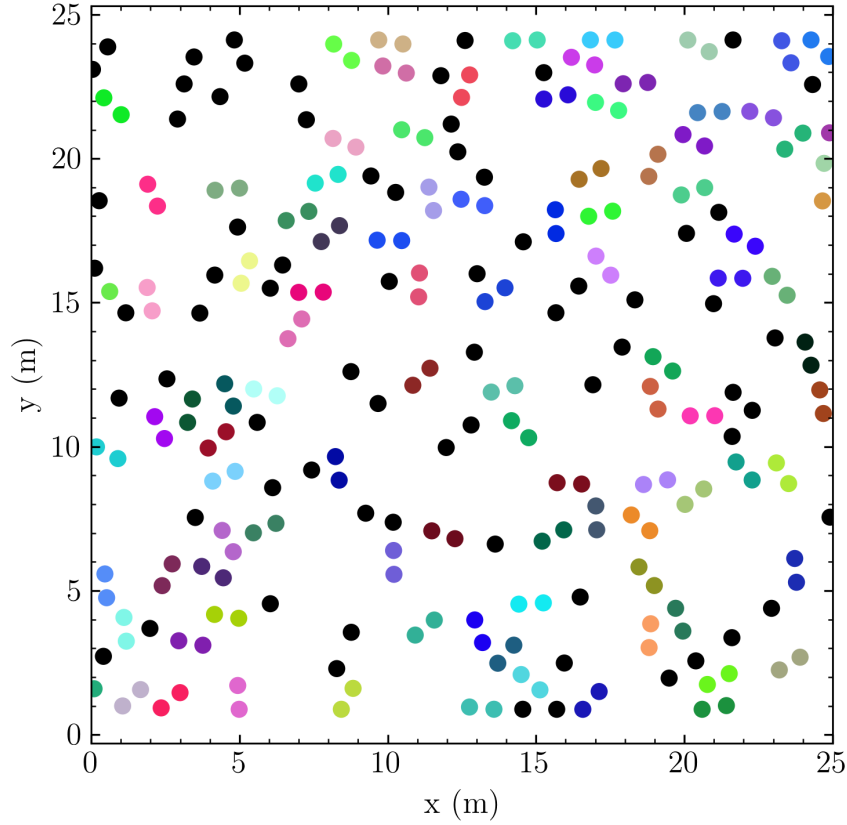


Figura 5.1: Estado de los individuos en un pasillo en $t = 50$ s, instante en que se realiza la medición de las distancias de separación entre los dúos. 500 personas circulan por el pasillo de 25 m de ancho y 50 m de largo, con condiciones de contorno periódicas (las partículas en $x = 50$ m son re-posicionadas en $x = 0$). En la figura se observa la mitad izquierda del pasillo ($0 \leq x \leq 25$ m). Para todos los individuos $v_d = 1$ m/s. Las personas comienzan distribuidas homogéneamente, a excepción de los integrantes de un mismo dúo que comienzan separados entre 40 y 70 cm entre sí, con un ángulo aleatorio. El 70 % de las personas forman parte de un dúo, y cada dúo es representado por un color distinto. En negro se representan a los no agrupados.

La distancia de separación entre integrantes de un mismo dúo se encuentran graficadas en la figura 5.2. Vale aclarar que los datos no están promediados, sino que efectivamente la distancia de separación para cada ϵ es única, y todos los dúos poseen la misma distancia de separación. Esto es esperable, pues para cada ϵ se tiene una única distancia de equilibrio (ver Apéndice A). A partir de estas distancias se puede trazar una relación entre ϵ y el tipo de relación afectiva en los dúos.

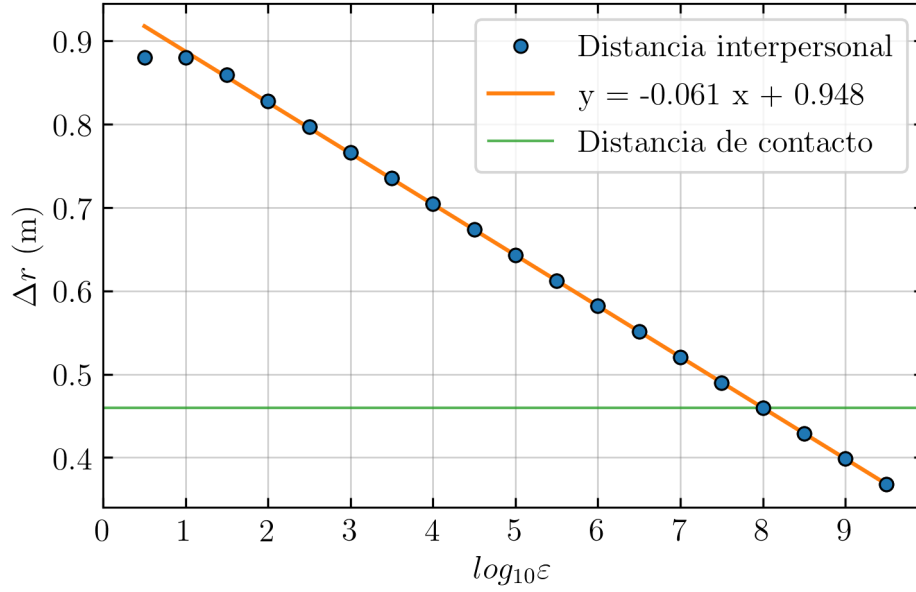


Figura 5.2: Distancia entre integrantes de un mismo dúo en función de ϵ . Las simulaciones se realizaron en un pasillo con densidad 0.4 P/m^2 , y las distancias se midieron en $t = 50 \text{ s}$. Se grafica también la distancia de contacto, que corresponde al diámetro de un individuo (0.46 m).

Las distancias siguen una relación lineal con el logaritmo de ϵ , excepto cuando $\epsilon \leq 10^1 \text{ N}$. Esto se puede explicar teniendo en cuenta que la fuerza de atracción actúa en la misma dirección (y sentido contrario) que la fuerza social, lo que genera una “competencia” entre ambas fuerzas que principalmente depende de ambas intensidades, A y ϵ , respectivamente. Como $A=2000 \text{ N}$ (ver sección 4.1), si $\epsilon \ll A$ la atracción será despreciable frente a la repulsión y por lo tanto la distancia de separación no dependerá de ϵ . Un análisis más detallado sobre esta “competencia” se puede ver en el Apéndice A.

Los grupos entran en contacto físico si $\epsilon > 10^8 \text{ N}$. Se decidió explorar esta región asumiendo cierto grado de compresión de los dúos.

El siguiente paso fue relacionar estos resultados con los datos empíricos de la figura 3.2. Las categorías allí graficadas se encuentran muy solapadas, por lo que sólo se tomaron en cuenta las más disjuntas: las de *parejas afectivas* y la de *colegas*. A cada categoría se le asoció un intervalo de distancias típicas. Este intervalo se definió como aquel centrado en la distancia media de la categoría (μ), extendiéndose en una desviación estándar hacia ambos lados ($\mu \pm \sigma$). En la figura 5.3.a se resaltan los intervalos de *parejas afectivas* y de *colegas*, respectivamente. En la figura 5.3.b se resaltan los mismos intervalos en el gráfico de la curva hallada computacionalmente.

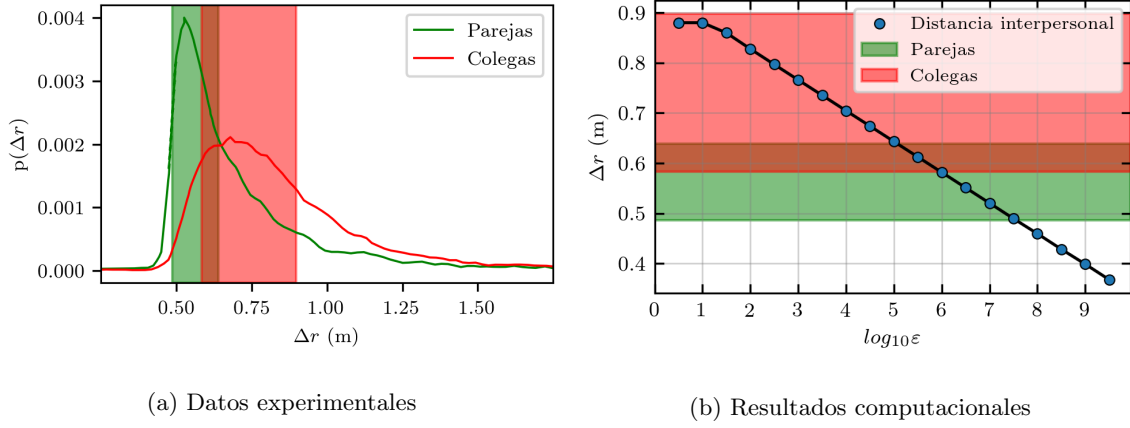


Figura 5.3: **(a)** Distribuciones de la distancia interpersonal entre *colegas* y entre *parejas afectivas*, medidas empíricamente. Se resaltan los intervalos característicos de cada distribución, considerando el promedio y la desviación estándar de cada una ($\mu \pm \sigma$). **(b)** Distancia de equilibrio en función de ϵ , resultante de simulaciones computacionales, con los mismos intervalos de distancia resaltados.

Viendo ambas figuras, se puede trazar una relación de correspondencia entre ϵ y los tipos de relaciones afectivas. Así, un dúo de *colegas* puede definirse en el modelo como un grupo con ϵ en un intervalo amplio entre 10^1 y 10^6 N, mientras que para una *pareja afectiva* ϵ se encuentra entre 10^5 y $10^{7.5}$ N. Cabe mencionar que la superposición de ambos intervalos indica la posibilidad de que dos *colegas* se encuentren a la misma distancia que una *pareja*, y viendo únicamente la distancia no se puede discriminar entre ambas categorías. Esta ambigüedad correspondería a “falsos negativos” entre categorías. No se harán consideraciones particulares respecto de este punto, pero se señalará en las siguientes secciones que la región de ϵ entre 10^5 y 10^6 N coincide con un cambio de la dinámica entre los dúos.

Las distribuciones de la figura 5.3.a son nulas para distancias menores a 0.5 m. Es posible que esto se deba a que en la cultura asiática, correspondiente a donde se realizaron las mediciones, incluso las parejas más íntimas no acostumbran a caminar de la mano o abrazadas. Es por eso que se decidió definir como *parejas íntimas* a grupos cuyo ϵ se encuentra entre $10^{7.5}$ y 10^9 N, correspondientes a distancias de entre 0.4 y 0.5 m. Esto corresponde —teniendo en cuenta que el diámetro de las personas está fijado en 0.46 m— a personas que están muy cerca e incluso apenas superpuestas (abrazadas).

Para ϵ mayores, una distancia de separación menor a 0.4 m implicaría una superposición de más del 15% de su cuerpo (para los parámetros utilizados). Mediciones experimentales muestran que para dicha compresión, la persona comienza a sufrir heridas en la zona del pecho y del tórax [7]. Dependiendo de la magnitud de la fuerza y el tiempo de aplicación de la misma, esto puede provocar fractura de las costillas. Cabe destacar que este hecho se puede producir

en ambientes de muy alta densidad: recitales masivos, situaciones de emergencia, etc. Por lo tanto, las mediciones experimentales en estos ambientes críticos son escasas. Esto conlleva a que se tenga escaso registro de distancias menores a 0.4 m.

En la tabla 5.1 se muestran a modo de resumen los resultados de esta sección: los rangos de distancia y de ϵ que corresponden a cada tipo de relación afectiva.

Tipo de relación	Distancia (m)	Intensidad afectiva ϵ (N)
Colegas	0.6 – 0.9	$10^1 - 10^6$
Pareja afectiva	0.5 – 0.65	$10^5 - 10^{7.5}$
Pareja íntima	0.4 – 0.5	$10^{7.5} - 10^9$

Tabla 5.1: Rangos de ϵ y de distancias características correspondientes a los distintos tipos de relaciones afectivas. Las distancias que figuran en la segunda columna son entre los centros de masa de las dos personas de un dúo. El radio de los individuos es 0.23 m.

Se desea destacar que para obtener una dispersión en las distancias de los dúos, bastará con variar ϵ dentro de los rangos definidos para la categoría respectiva.

La conclusión general de esta sección es que existe una relación lineal entre la distancia típica de separación intra-grupal y el logaritmo de la intensidad del lazo afectivo. En consecuencia, se determinó qué intensidades afectivas corresponden a la categoría *colegas*, *parejas afectivas* o *parejas íntimas*. Mientras que la medida de la intensidad afectiva se encuentra dentro del contexto del SFM, las distancias de separación resultantes se encuentran soportadas por documentación fílmica.

Habiendo hecho una calibración de la fuerza afectiva, se procedió a analizar qué efectos produce en evacuaciones de emergencia.

5.2. Evacuaciones de emergencia con grupos sociales: tiempo de evacuación

En esta sección se analizará la dinámica de las evacuaciones de emergencia. Las evacuaciones se realizan en recintos cuadrados de 20 m de lado, con una única puerta de 0.92 m de largo en el centro de una de las paredes. Se verá cómo cambia el tiempo de las evacuaciones por el hecho de considerar la existencia de grupos sociales dentro de la multitud. Se realizará también un estudio microscópico del sistema para analizar su comportamiento.

En cada simulación todos los individuos tienen la misma v_d y todos los dúos tienen el mismo ϵ . Por lo tanto, el tiempo de evacuación depende únicamente de estas variables (más allá de la

dinámica propia del SFM).

El tiempo de evacuación en función de la velocidad de deseo v_d para distintos valores de la intensidad afectiva ϵ se encuentra graficado en la figura 5.4. Cada valor mostrado corresponde al promedio de los tiempos de evacuación de 100 simulaciones. Se estudiaron simulaciones en donde el 100 % de las personas se encuentra agrupada, o bien, en las que el 25 % lo está.

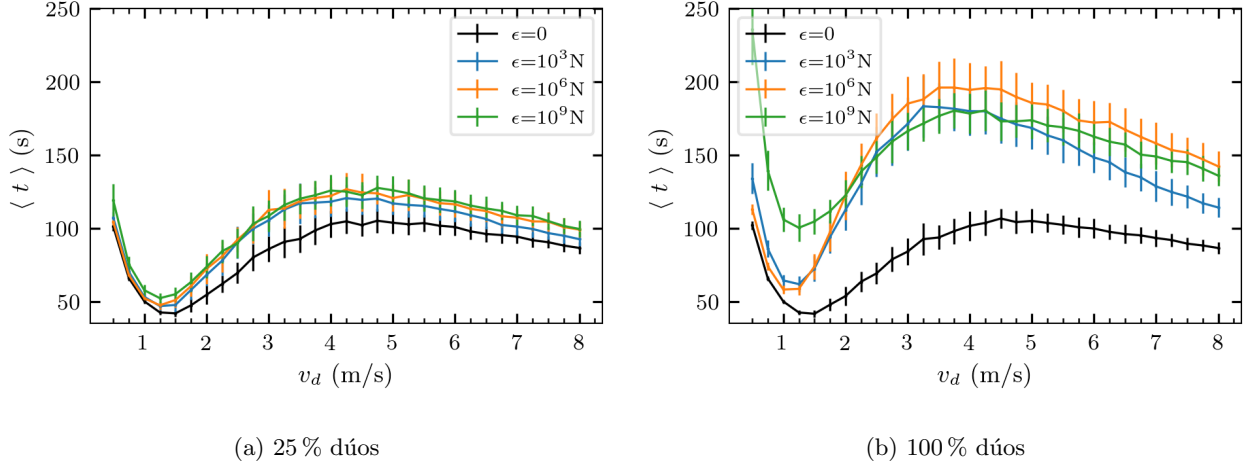


Figura 5.4: Tiempo de evacuación en función de v_d para distintos valores de ϵ fijo. $\epsilon = 0$ representa el caso en que no se considera la existencia de grupos. Las simulaciones transcurren en recintos cuadrados de 20 m de lado, con una puerta de 0.92 m en el centro de uno de ellos (ver figura 4.1). Los datos son el promedio de 100 simulaciones con diferentes condiciones iniciales. **(a)** El 25 % de las personas forman parte de un dúo. **(b)** El 100 % de las personas forman parte de un dúo.

Cuando el 25 % de las personas forman parte de un dúo, el tiempo de evacuación aumenta con respecto a no considerar la fuerza de atracción. Sin embargo, considerar distintos ϵ (no nulos) no produce cambios significativos, como se ve en la figura 5.4.a.

Por el contrario, cuando el 100 % de las personas forman parte de un grupo, dependiendo de la magnitud de la fuerza afectiva se modifica considerablemente el tiempo de evacuación. En algunos casos, incluso, el tiempo llega a duplicarse.

Los efectos *faster is slower* y *faster is faster* introducidos en la sección 3.1 siguen estando cualitativamente presentes, aunque se modifica levemente la posición del máximo respecto de v_d .

Para observar en detalle las variaciones del tiempo de evacuación para distintas intensidades de la fuerza afectiva, en la figura 5.5 se grafica el tiempo de evacuación en función de ϵ con distintas v_d .

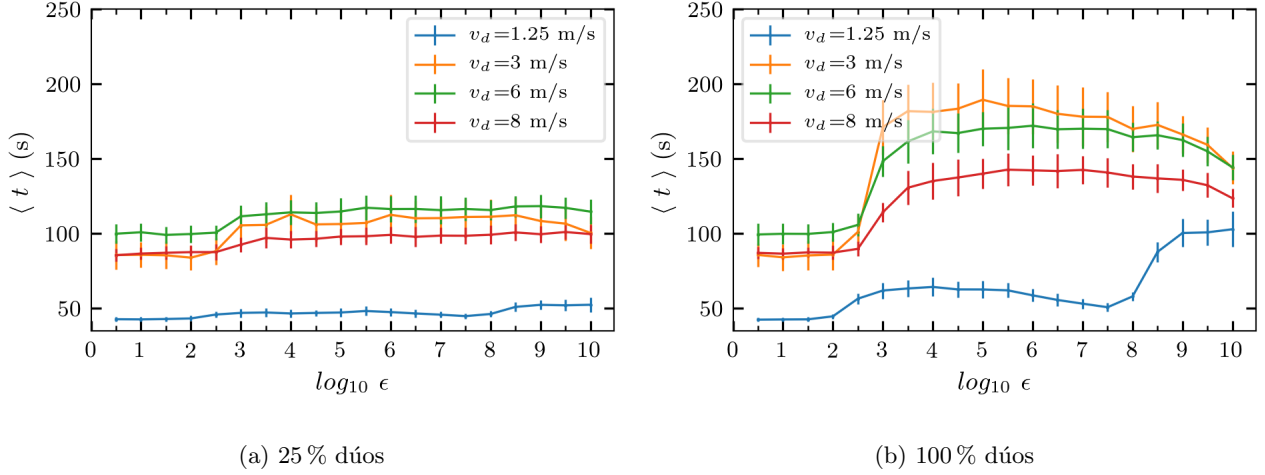


Figura 5.5: Tiempo de evacuación en función de ϵ para distintos valores de v_d fijo. Las simulaciones transcurren en recintos cuadrados de 20 m de lado, con una puerta de 0.92 m en el centro de uno de ellos (ver figura 4.1). Los datos son el promedio de 100 simulaciones con diferentes condiciones iniciales. **(a)** El 25 % de las personas forman parte de un dúo. **(b)** El 100 % de las personas forman parte de un dúo.

Nuevamente, en el caso en el que el 25 % de las personas se encuentra agrupada se observan pocas diferencias al variar la intensidad afectiva, mientras que si el 100 % de las personas forman parte de un dúo las variaciones se distinguen a simple vista.

En ambos casos, las curvas son planas para $\epsilon \leq 10^2$. Esto significa que no hay diferencia significativa entre considerar $\epsilon = 0$ (sin lazos afectivos y por lo tanto equivalente a no considerar la existencia de grupos) y $\epsilon \leq 10^2$ N (lazos afectivos débiles, dentro de la categoría de *colegas*). Esto se debe a que la “competencia” entre la fuerza de repulsión social (2.2) y la fuerza de atracción (2.6) se da a través de ambas intensidades, A y ϵ respectivamente. Como $A=2000$ N (ver sección 4.1), la existencia de grupos tendrá un impacto notable en la evacuación si $\epsilon \gtrsim A$.

Para ϵ entre 10^3 y 10^7 N, la evacuación se ralentiza, mientras que para $\epsilon \geq 10^7$ N el tiempo decrece. Este comportamiento es análogo al *faster is slower* y *faster is faster* introducidos en la sección 3.1. Pero, a diferencia de la figura 3.1, en este caso se mantiene fijo v_d y lo que varía es la intensidad del lazo afectivo. Por ese motivo, el actual comportamiento podría definirse como *closer is slower* (más cerca es más lento) y *closer is faster* (más cerca es más rápido), respectivamente. En la sección 5.3 se analiza la causa de este comportamiento. En resumen, el fenómeno *closer is slower* se presenta cuando los miembros de cada dúo no están en contacto. Para $\epsilon > 10^7$ N éstos entran en contacto, mejorando parcialmente la circulación de la multitud.

Un caso particular es el de $v_d = 1.25$ m/s, que como se comenta en la sección 3.1 es la que minimiza el tiempo de evacuación sin presencia de grupos, y como se ve en la figura 5.5 también lo minimiza para cualquier valor de ϵ . Sin embargo, el tiempo de evacuación aumenta

bruscamente a partir de $\epsilon = 10^8$ N, contrariamente a lo que sucede con las velocidades de deseo mayores. Este fenómeno se explica con más detalle en el Apéndice B, pero en resumen, a partir de esta intensidad los miembros de los dúos entran en contacto físico permanentemente, y con v_d relativamente baja esto perjudica el flujo de salida del recinto.

El mapa de contorno para el tiempo de evacuación en función de v_d y de ϵ combina las figuras 5.4 y 5.5 en la figura 5.6. Las figuras 5.4 y 5.5 se interpretan como las curvas de nivel de estos mapas, con $\epsilon = cte$ y $v_d = cte$, respectivamente.

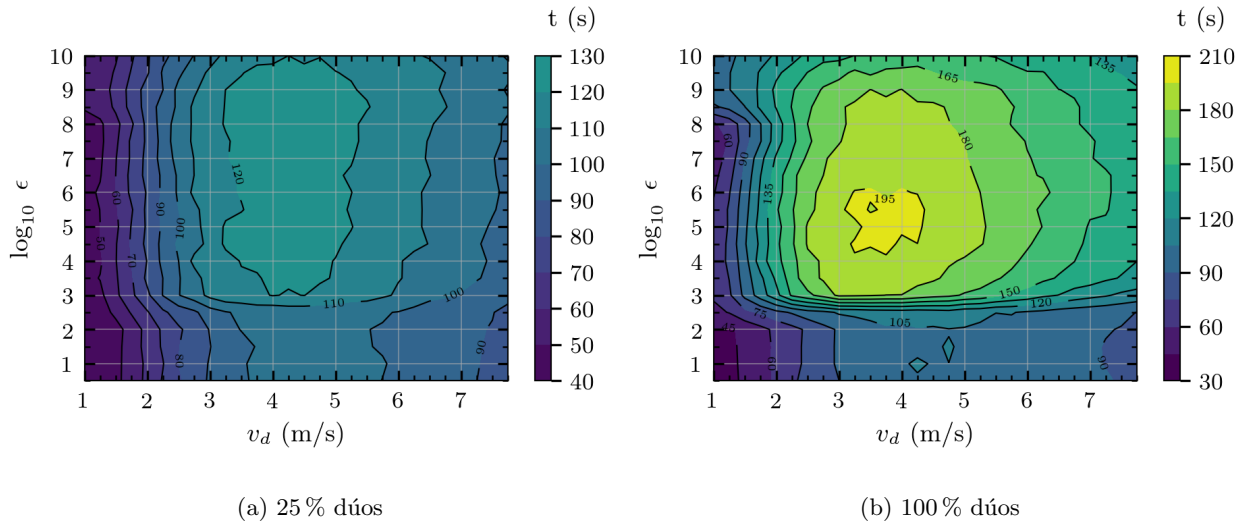


Figura 5.6: Tiempo de evacuación en función de ϵ y v_d , para $v_d > 1$ m/s. **(a)** 25 % de las personas forman parte de un dúo. **(b)** 100 % de las personas forman parte de un dúo.

En todos los casos, el tiempo de la evacuación es mayor cuando los dúos conforman el 100 % de la multitud, como se observa a simple vista en las figuras 5.4 y 5.5. Este resultado muestra que la existencia de grupos sociales dentro de la multitud tiene efectos negativos sobre el tiempo de evacuación, y éstos se ven amplificadas cuanta más cantidad de grupos hay.

En ambos casos se observan patrones bien definidos: el efecto *faster is slower/faster*, al recorrer el mapa horizontalmente (con ϵ fijo), el *closer is slower/faster* al recorrer el mapa verticalmente (con v_d fija) y la combinación de éstos. En la figura 5.6.b, en la región $v_d < 1.5$ m/s y $\epsilon > 10^8$ N se observa un cierto aumento del tiempo de evacuación que, como se mencionó, se discute en el Apéndice B.

Por otro lado, se puede comparar la variación del tiempo de evacuación en función de ϵ con los resultados de la sección 5.1 (ver Tabla 5.1). El rango de ϵ correspondiente a los *colegas* ($\epsilon < 10^6$ N) coincide con el rango de *closer is slower*, el rango de *parejas afectivas* (10^5 N $< \epsilon < 10^{7.5}$ N) corresponde al pico máximo de tiempo de evacuación, y por último el rango de *parejas íntimas* ($\epsilon > 10^{7.5}$ N) al efecto *closer is faster*.

5.3. Descripción esquemática de los efectos *closer is slower* y *closer is faster*

Al considerar la existencia de grupos sociales en una multitud, se suma la fuerza de atracción F_a (Ec. 2.6) a la ecuación del SFM. Dependiendo de la intensidad ϵ , ésta puede tener mayor magnitud que el resto de las fuerzas. En la figura 5.7 se comparan esquemáticamente la fuerza de deseo y la fuerza de atracción presentes en una multitud con y sin grupos sociales.

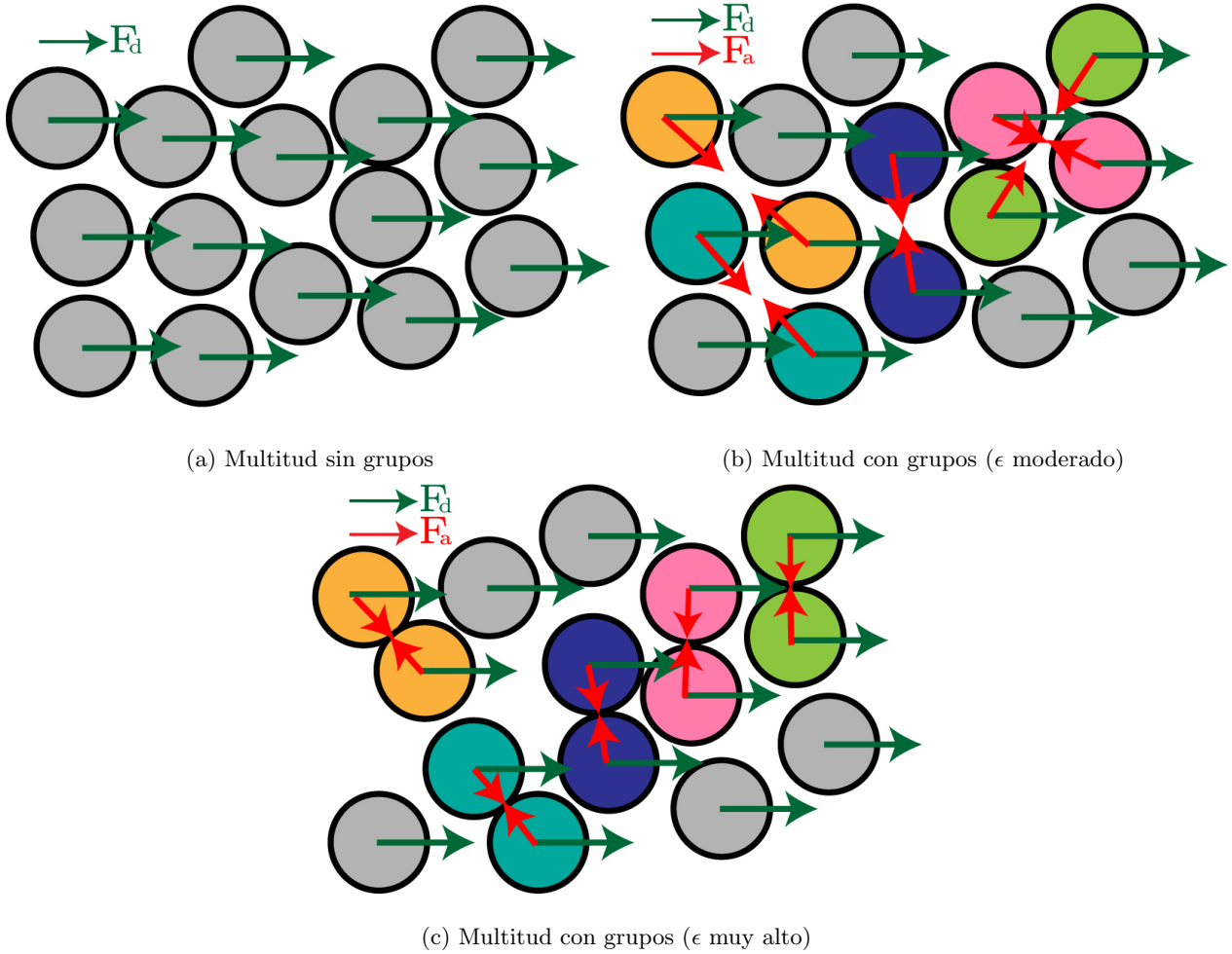


Figura 5.7: Comparación esquemática entre una multitud sin grupos sociales y una con grupos de dos personas (dúos). Con cada color se representa a un dúo distinto. Se muestran graficadas la fuerza de deseo (en verde) y la fuerza de atracción (en rojo).

Al generarse fuerzas que apuntan en direcciones distintas a la fuerza de deseo, si un dúo se encuentra separado, esas fuerzas pueden entorpecer la circulación. Por ejemplo, para un dado individuo, la fuerza de atracción puede ir en la dirección contraria a la de deseo, ralentizándolo, o dos integrantes de un dúo pueden interferir en el camino de otro, como sucede en la figura 5.7.b con los integrantes del *dúo celeste* y el individuo que se encuentra abajo y a su izquierda.

En cambio, si los vínculos afectivos son elevados, los integrantes de un dúo se encuentran permanentemente en contacto como se observa en la figura 5.7.c. La fuerza de atracción entre ambos se contrarresta sin que afecte a otras personas, y lo que se observa es que el dúo se comporta como un único individuo de mayor tamaño. Además, el rozamiento entre miembros de distintos dúos disminuye.

La intensidad ϵ para la cual los dúos entran (y permanecen) en contacto dependen de las variables del sistema como la densidad ρ , la velocidad de deseo v_d , o la geometría del recinto. Si los dúos no están en contacto, al aumentar ϵ las fuerzas que entorpecen el tránsito se incrementan. Si por el contrario los dúos sí permanecen en contacto, entonces al aumentar ϵ la distancia de equilibrio será menor, el “tamaño efectivo” del dúo será menor y entorpecerá en menor medida la circulación. De esta manera surgen los efectos *closer is slower* y *closer is faster*.

En las evacuaciones de emergencia, esto se ve reflejado en el tiempo que sobreviven los *blocking clusters*, ya que la fuerza de atracción puede apuntar en la dirección opuesta a la salida, y por lo tanto aumenta o disminuye el tiempo de evacuación. Según el caso estudiado, este entorpecimiento del sistema se puede ver reflejado en otros observables, como la velocidad de la multitud o en el flujo de peatones (ver sección 5.5).

5.4. Evacuaciones de emergencia con grupos sociales: *delays* entre individuos

En esta sección se realiza un análisis microscópico del sistema por medio del estudio de los *delays*, es decir la diferencia entre el tiempo en el que evacúa una persona del recinto y el tiempo en el que evacúa la siguiente. Este análisis revela información importante en el sistema y está asociada a la dinámica de los *clusters* que bloquean la puerta.

Se realizaron simulaciones bajo las mismas condiciones que en la sección anterior. Sólo se muestran los resultados de las configuraciones con el 100 % de las personas agrupadas, ya que en este caso los cambios en la dinámica son notablemente más apreciables en comparación con el caso en el que el 25 % forma parte de un grupo.

El análisis se divide según dos tipos de *delays*: los *delays intra-grupales*, que es el tiempo que transcurre desde que evacúa el primer integrante de un dúo hasta que evacúa el segundo, y los *delays secuenciales* entre individuos que evacúan consecutivamente independientemente del grupo al que pertenezcan. Cabe mencionar que al sumar la duración de todos los *delays secuenciales* de una misma evacuación se obtiene el tiempo total que tardó la misma.

Ambos tipos de *delays* se esquematizan en la figura 5.8.

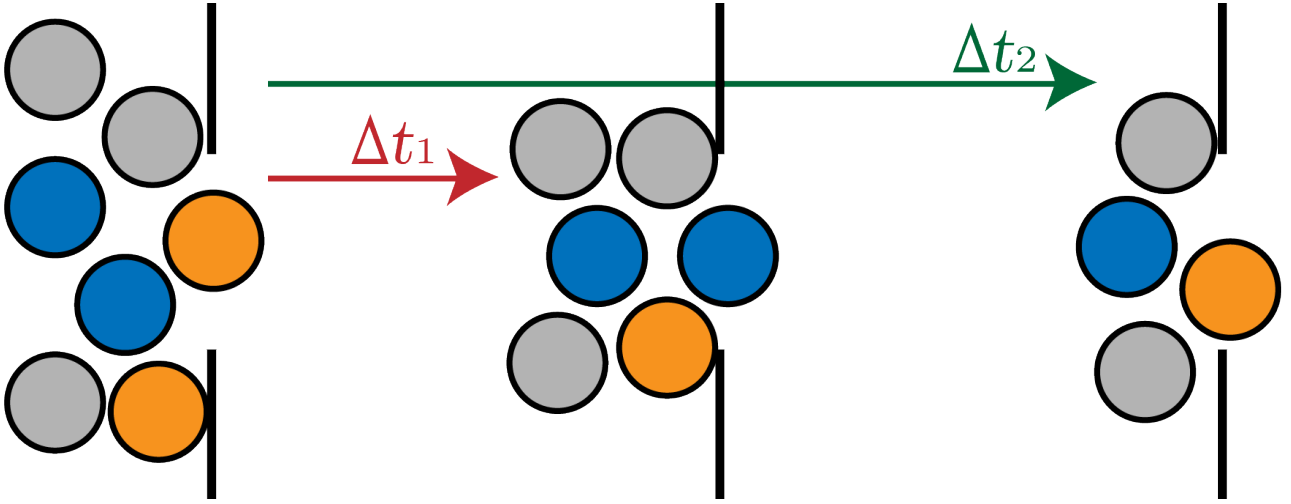


Figura 5.8: Esquema de los distintos tipos de *delays*. Se grafican 3 instantes de una evacuación de emergencia. La línea negra representa la pared del recinto, en la que se encuentra la salida. Cada dúo es representado por un color distinto. La primera figura retrata el instante en el que evacúa el primer individuo del dúo *naranja*. Luego de un tiempo Δt_1 evacúa el siguiente individuo, que pertenece al dúo *azul*. De esta manera, el tiempo Δt_1 es un *delay secuencial*, porque es el tiempo que transcurre entre que dos individuos evacuaron consecutivamente. Un tiempo Δt_2 después de la primera imagen evacúa el individuo restante del dúo *naranja*. Δt_2 es entonces un *delay intra-grupal*, ya que es el tiempo que transcurrió desde que evacuó el primer integrante del dúo *naranja* hasta que evacuó el segundo.

Los *delays intra-grupales* darán información de la dinámica de los grupos cerca de la salida. Los *delays secuenciales* darán información del comportamiento colectivo de la multitud, y de cómo se modifica dependiendo del tipo de relación afectiva de los dúos.

5.4.1. *Delays* intra-grupales

La distribución de los *delays intra-grupales* de todos los dúos se muestra en la figura 5.9. Los bins de cada histograma tienen un ancho de 0.25 segundos. El número de *delays* no está normalizado sino que se cuentan los *delays* medidos durante las 100 simulaciones de todos los dúos.

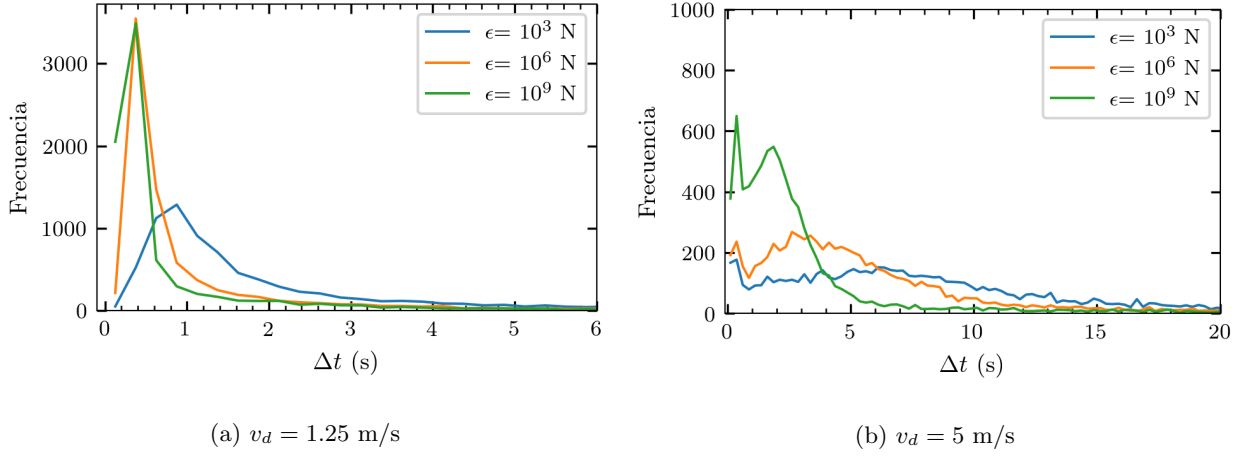


Figura 5.9: Distribución de *delays* intra-grupales, para tres valores representativos de ϵ fijos. El 100 % de las personas forman parte de un dúo. Los bins de cada histograma tienen un ancho de 0.25 segundos. La velocidad de deseo está fija en cada caso: **(a)** $v_d = 1.25$ m/s (que minimiza el tiempo de evacuación) **(b)** $v_d = 5$ m/s (que maximiza el tiempo de evacuación).

Para los dúos en el rango de *colegas* ($\epsilon < 10^6$ N), se observa una distribución más ancha, mientras que al aumentar ϵ hacia el rango de las *parejas* ($\epsilon > 10^5$ N) se observa la concentración de las distribuciones sobre tiempos más cortos. Además, comparando ambos gráficos, se observa que en el caso de $v_d = 1.25$ m/s se acentúa significativamente la presencia de los *delays* cortos ($\Delta t < 3$ segundos). Esto es consistente con el hecho de que el tiempo total de la evacuación es menor con $v_d = 1.25$ m/s y mayor con $v_d = 5$ m/s.

En la figura 5.9.b se observan *delays* relativamente largos, del orden de los 15 segundos o más para todos los ϵ . Más precisamente, el porcentaje de los *delays* que son mayores a 15 segundos en las curvas con $\epsilon = 10^3$, 10^6 y 10^9 N es del 22 %, 12 % y 6 %, respectivamente. En las animaciones de las simulaciones se observa que éstos corresponden a los dúos que se encuentran en las cercanías de la salida del recinto, sobre las paredes que la delimitan.

Este fenómeno es consistente con trabajos previos del grupo, en los que se mostró que los *blocking clusters* se fracturan lejos de las paredes y frente a la salida [16]; los individuos cercanos a las paredes laterales, en cambio, permanecen más tiempo “atrapados” en el *blocking cluster*. Dependiendo del nivel de ansiedad de la multitud, los compañeros de los individuos cercanos a las paredes evacuarán inmediatamente del recinto o esperarán a la salida aunque estén en condiciones de irse.

Cuanto mayor es la intensidad del vínculo ϵ , menor es la posibilidad de que se rompa. Por ejemplo, si la intensidad del vínculo corresponde a la categoría de *colegas*, éste puede romperse fácilmente, mientras para que las *parejas íntimas* el vínculo tendrá una probabilidad menor de

romperse. En ese caso, es de esperar que ambos salgan prácticamente juntos. Por lo tanto, el *delay intra-grupal* será menor. Esto se observa claramente en la figura 5.9.b.

Dos ejemplos en que el *delay intra-grupal* es mayor a 15 segundos se muestran en la figura 5.10. Las imágenes corresponden a una simulación con $v_d = 5$ m/s y $\epsilon=10^9$ N (*parejas íntimas*), y se puede ver un video completo de la misma [en este link](#).

Cabe destacar que las separaciones de los dúos en las cercanías de la salida divide a los *delays intra-grupales* en dos: aquellos dúos que son separados antes de salir, y los que logran salir juntos. Se analizarán a continuación los *delays secuenciales*, es decir, los *delays* entre dos individuos que salen consecutivamente del recinto, independientemente de si pertenecen al mismo dúo o no, para abarcar a ambas posibilidades.

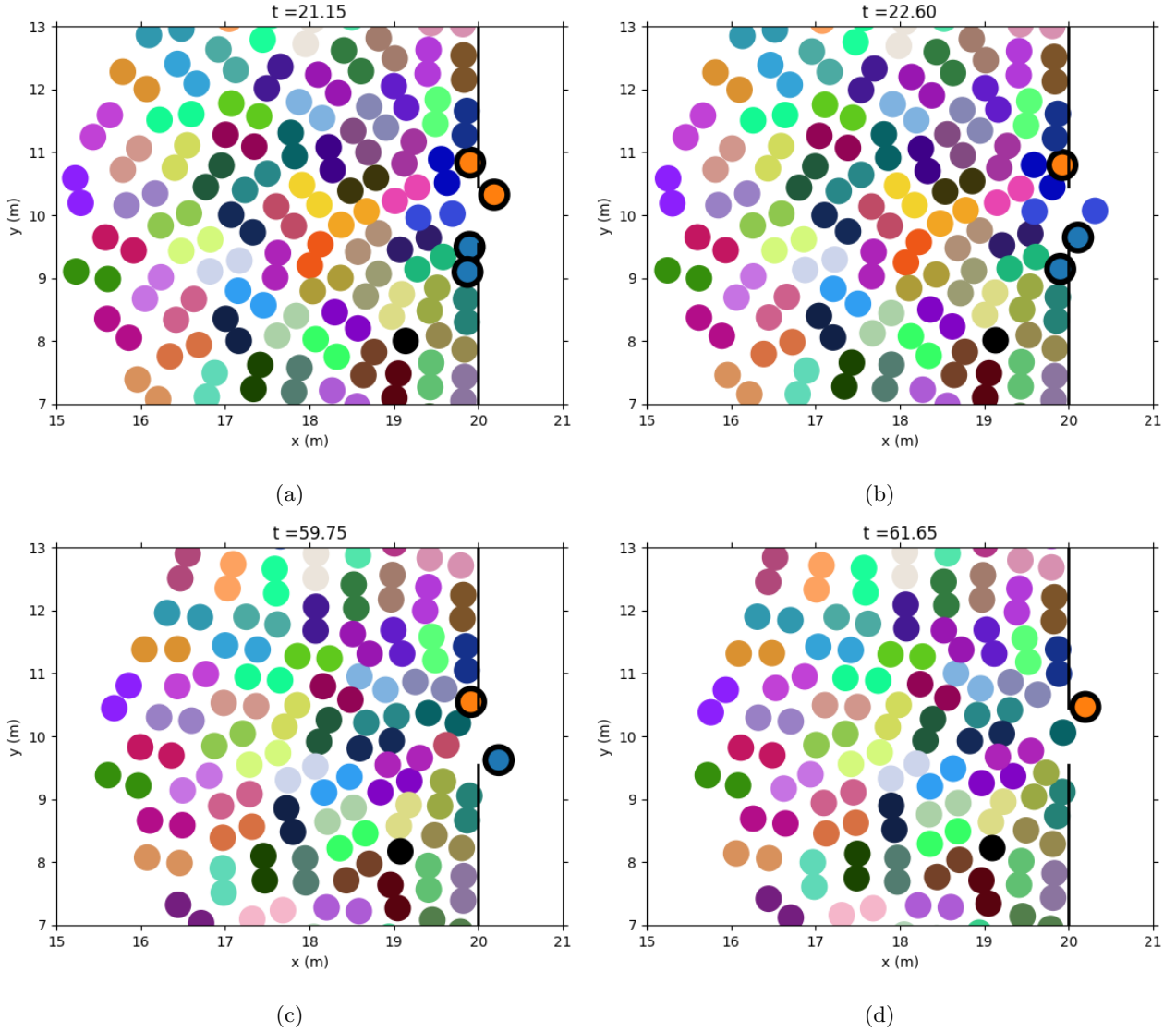


Figura 5.10: Distintos momentos en una evacuación de emergencia, con $v_d = 5$ m/s y $\epsilon=10^9$ N. Cada dúo está representado por un color distinto, y el 100 % de la multitud forma parte de un dúo. Los dúos con reborde negro son aquellos en los que uno de los integrantes sale del recinto más de 15 segundos después que el otro. **(a)** En $t=21.15$ s, evacúa un integrante del *dúo naranja* que se encuentra en la parte superior a la puerta. **(b)** En $t=22.60$ s, evacúa un integrante del *dúo celeste* que se encuentra en la parte inferior a la puerta. **(c)** En $t=59.75$ s, evacúa el otro integrante del *dúo celeste*, 37.15 segundos después que su compañero. **(d)** En $t=61.65$ s, evacúa el otro integrante del *dúo naranja*, 40.5 segundos después que su compañero. Un video completo de la simulación se encuentra disponible [en este link](#)

5.4.2. Delays entre individuos o secuenciales

Las distribuciones de *delays* entre individuos, pertenezcan o no al mismo dúo, se encuentran graficados en la figura 5.11. Al igual que en la sección anterior, se midieron los *delays* y se construyeron histogramas con bins de 0.25 s de ancho.

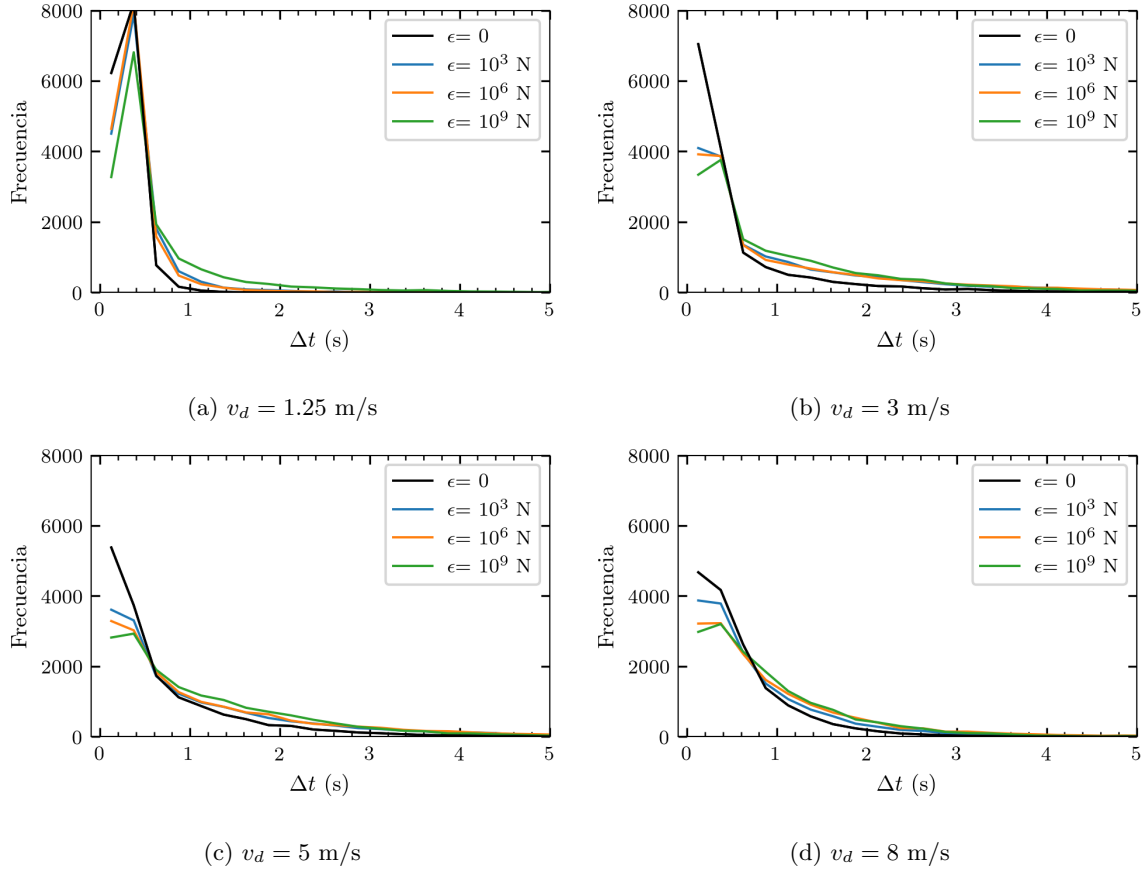


Figura 5.11: Distribución de *delays* entre individuos cualesquiera que evacúan consecutivamente, para distintos valores representativos de ϵ . $\epsilon = 0$ es equivalente a no considerar la presencia de grupos en la simulación, y en el resto de los casos el 100 % de las personas forman parte de un dúo. Los bins de cada histograma tienen un ancho de 0.25 segundos. **(a)** $v_d = 1.25$ m/s (correspondiente al mínimo tiempo de evacuación). **(b)** $v_d = 3$ m/s (correspondiente al comportamiento *faster is slower*). **(c)** $v_d = 5$ m/s (correspondiente al máximo tiempo de evacuación). **(d)** $v_d = 8$ m/s (correspondiente al comportamiento *faster is faster*).

Se puede observar que para $v_d = 1.25$ m/s hay grandes picos ubicados en los *delays* “cortos” ($\lesssim 1$ s), mientras que, en comparación, para $v_d = 5$ m/s se tienen distribuciones más anchas. Para $v_d = 3$ y 8 m/s, las distribuciones tienen un ancho intermedio.

Las distribuciones mostradas en la figura 5.11 no exhiben diferencias significativas al variar ϵ , salvo para el caso $\epsilon = 0$. En ese caso, la mayoría de los *delays* *secuenciales* son muy cortos.

Una de las mayores diferencias entre los gráficos es que para $v_d = 1.25$ y 3 m/s (figuras 5.11.a y 5.11.b, respectivamente), la mayoría de los *delays* son “cortos” ($\Delta t \lesssim 1$ s) mientras que en

el resto se observan distribuciones menos concentradas. A su vez, se puede observar que en todas las figuras, la cantidad de *delays* “largos” ($\Delta t \gtrsim 4$ s) es prácticamente despreciable. Sin embargo, como un *delay* de 4 segundos aporta al tiempo de evacuación lo equivalente a 4 *delays* de 1 segundo (por ejemplo), entonces no puede afirmarse *a priori* que la contribución de los *delays* “largos” es despreciable.

En la figura 5.12 se grafica la suma de todos los *delays* cortos ($\Delta t < 1$ s), de los medianos ($1 \text{ s} \leq \Delta t \leq 4 \text{ s}$) y de los largos ($\Delta t > 4 \text{ s}$). Cabe aclarar que lo que se suma es la duración de todos los *delays* dentro de cada categoría, y no la cantidad. Formalmente, esto es $\sum_i [\Delta t_i \cdot f(\Delta t_i)]$, donde $f(\Delta t_i)$ es la cantidad de *delays* de duración Δt_i .

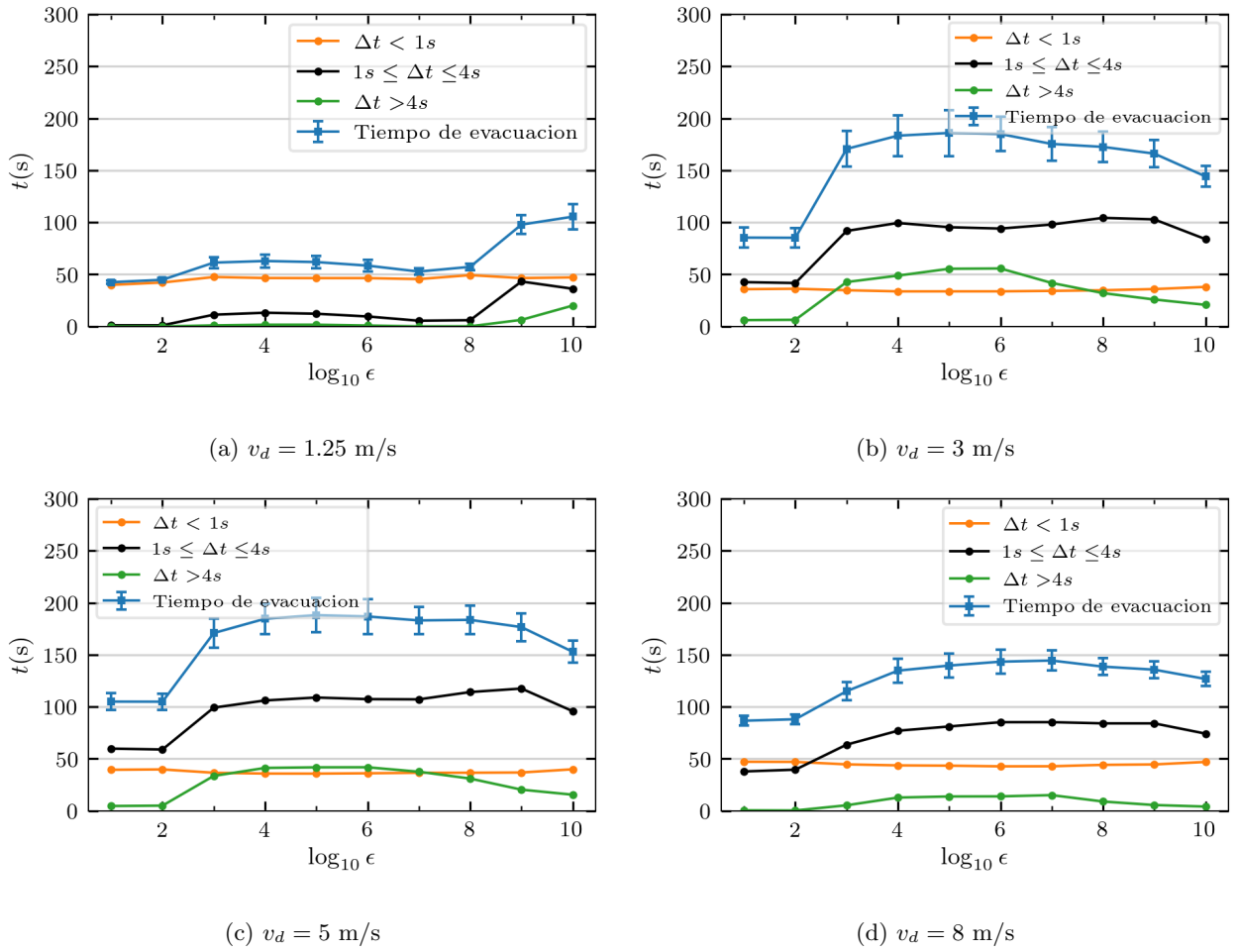


Figura 5.12: Suma de los *delays* cortos, medianos y largos entre individuos, para distintos valores de ϵ fijo. $\epsilon = 0$ es equivalente a no considerar la presencia de grupos en la simulación, y en el resto de los casos el 100 % de las personas forman parte de un dúo.

(a) $v_d = 1.25$ m/s (correspondiente al mínimo tiempo de evacuación). (b) $v_d = 3$ m/s (correspondiente a la sección *faster is slower*). (c) $v_d = 5$ m/s (correspondiente al máximo tiempo de evacuación). (d) $v_d = 8$ m/s (correspondiente a la sección *faster is faster*).

Como al sumar todos los *delays* de una única evacuación se obtiene el tiempo total que tardó la misma, luego de calcular cada una de las contribuciones, se dividió por la cantidad de simulaciones. De esta manera, la suma de la contribución de todas las categorías de *delays* es igual al tiempo de evacuación promediado, que también se grafica como referencia.

Como se puede observar, la contribución de los *delays* cortos (curva naranja) depende levemente de v_d , pero es constante en ϵ . Eso significa que cualquier cambio en la dinámica de la evacuación producido al variar ϵ se debe a la variación de la contribución de los *delays* medianos y largos.

Exceptuando el caso de $v_d = 1.25$ m/s (que se discute en el Apéndice B), se encuentran distintos patrones en la dinámica de los *delays* medianos y largos. En la transición de los efectos *closer is slower* y *closer is faster* ($\epsilon \simeq 10^7$ N), el tiempo de evacuación comienza a decrecer. Sin embargo, este decaimiento no se refleja en todos los tipos de *delays* por igual: mientras que los largos (curva verde) decrecen al igual que el tiempo de evacuación, los *delays* medianos (curva negra) comienzan a crecer levemente. Observando los videos de las simulaciones, se vio que este efecto se debe a que al aumentar ϵ los *blocking clusters* se rompen más rápido, y así el tiempo en que la salida permanece bloqueada es menor. De esta manera, por la menor persistencia de los *clusters*, se explica la “transferencia” de tiempo de los *delays* largos hacia los medianos. El efecto neto es la reducción en el tiempo de la evacuación.

Para una mejor visualización de la contribución de los *delays* medianos y largos en función de ϵ y v_d , y en particular para poder observar la diferencia en el comportamiento de ambos, en la figura 5.13 se presentan mapas de contorno de los mismos. Los gráficos de la figura 5.12 se interpretan como curvas de nivel con $v_d = cte$.

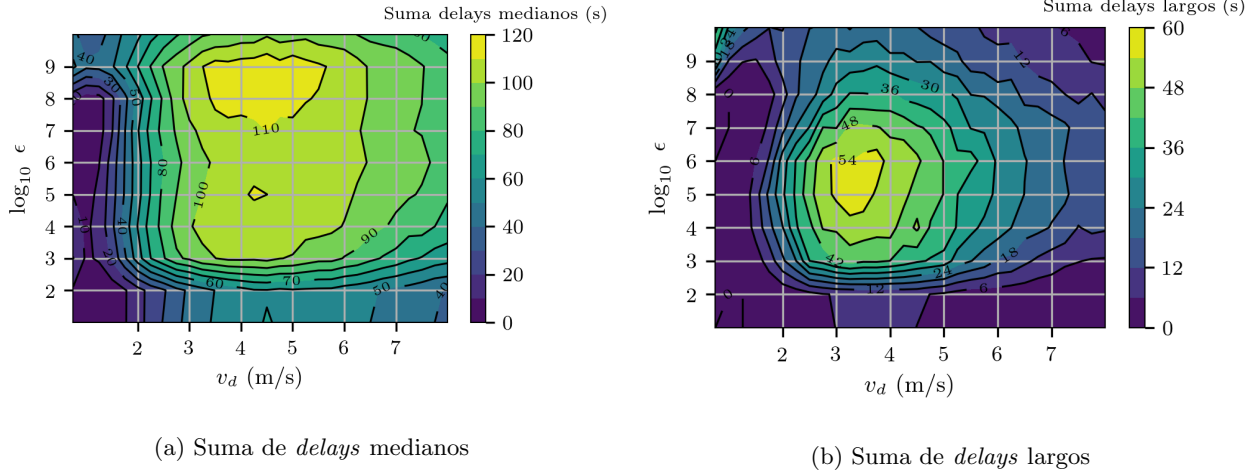


Figura 5.13: Mapas de contorno de la contribución de *delays* entre individuos que evacúan consecutivamente. Cada caso corresponde al resultado promedio de 100 iteraciones. En cada simulación, el 100 % de las personas forman parte de un dúo. **(a)** Suma de *delays* medianos ($1 \text{ s} \leq \Delta t \leq 4 \text{ s}$). **(b)** Suma de *delays* largos ($\Delta t > 4 \text{ s}$).

A partir de los mapas de contorno, queda claro que la dinámica de los *delays* medianos y largos es notablemente distinta. En la figura 5.13.a se observa que el máximo de la contribución de los *delays* medianos se encuentra en la parte superior del mapa, en la sección *closer is faster* ($\epsilon \gtrsim 10^7 \text{ N}$), mientras que en la figura 5.13.b se ve que para los *delays* largos el máximo se alcanza en la región *closer is slower* ($10^3 \text{ N} \lesssim \epsilon \lesssim 10^7 \text{ N}$).

En otras palabras, en la sección *closer is slower* ambas contribuciones aumentan, lo que explica el considerable incremento en el tiempo de evacuación. En la sección *closer is faster* se observa una “transferencia” de tiempo de los *delays* largos hacia los medianos, y que tiene como efecto neto una reducción en el tiempo total. Luego, a partir de $\epsilon = 10^9 \text{ N}$, ambas contribuciones se reducen.

5.4.3. Clasificación de *Delays* intra-grupales e inter-grupales

Un *delay* es la diferencia de tiempo entre dos evacuados consecutivos, que pueden pertenecer al mismo dúo o no. Es decir, de todos los *delays* entre individuos que evacúan consecutivamente, se puede cuantificar cuántos de ellos son *delays intra-grupales* y cuántos son *inter-grupales*. Este análisis permite conocer el “ordenamiento” de la evacuación. En este sentido, en una evacuación “idealmente ordenada” — en la que sale un individuo, luego su pareja, luego otro individuo, luego su pareja y así sucesivamente— el 50 % de los *delays* serán intra-grupales.

En las animaciones de las simulaciones se pudo ver que en ocasiones un integrante de un dúo evacúa de forma simultánea con un individuo de otro dúo, y una fracción de segundo después evacúa su pareja. Esto sucede porque el ancho de la puerta equivale al diámetro de dos

individuos. Sin embargo, eso no quiere decir que el dúo en cuestión se haya separado durante la evacuación, sino que a todo fin práctico puede afirmarse que evacuaron consecutivamente. Un ejemplo de esta situación se puede observar en la figura 5.14. Para tener en cuenta esa salvedad, se flexibilizó el concepto de “inmediatamente” y se contó como “*delay* de dúo” si entre un individuo y su pareja salieron tres personas como máximo — al considerar un umbral menor a tres personas, nunca se alcanza una evacuación idealmente ordenada”, mientras que un umbral mayor no permite distinguir este tipo de *delay*. Con esa aclaración, el porcentaje de *delays* provenientes de dúos se muestra en la figura 5.15.

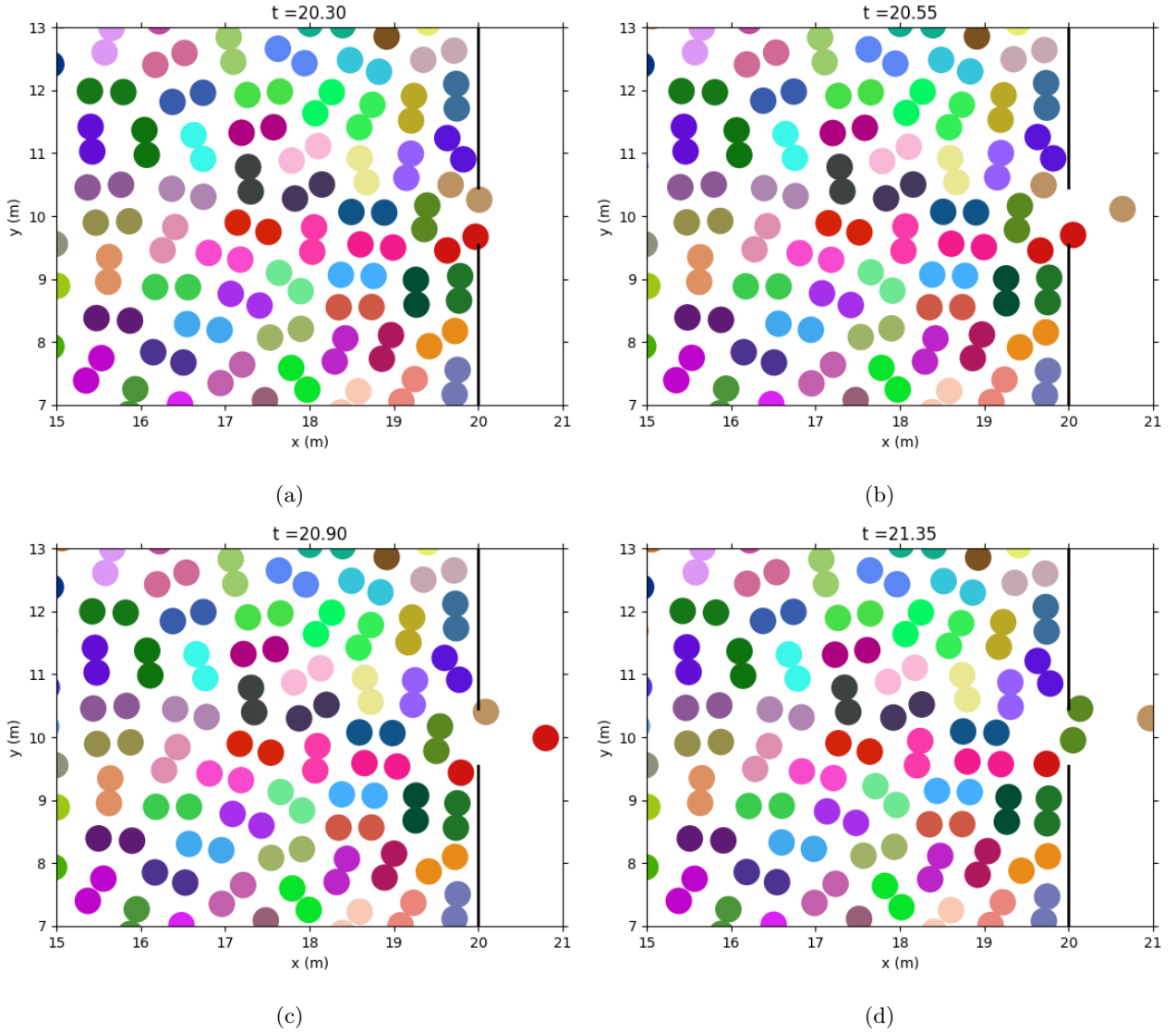


Figura 5.14: Distintos momentos en una evacuación de emergencia, en los que se observa cómo dos individuos de distintos dúos salen del recinto casi simultáneamente, y una fracción de segundo después evacúa el compañero de uno de ellos. También se muestra una situación en la que dos integrantes del mismo dúo evacúan conjuntamente. Todos los individuos tienen $v_d = 1.25$ m/s y los dúos $\epsilon = 10^9$ N. Cada dúo está representado por un color distinto. **(a)** En $t = 20.30$ s, evacúa un integrante del *dúo marrón* que se encuentra en la parte superior a la puerta. **(b)** En $t = 20.55$ s, evacúa un integrante del *dúo rojo* que se encuentra en la parte inferior a la puerta. **(c)** En $t = 20.90$ s, evacúa el otro integrante del *dúo marrón*, apenas 0.6 segundos después que su compañero. **(d)** En $t = 21.35$ s, evacúan casi simultáneamente dos individuos del mismo dúo, en este caso representado en color verde. Un video completo de la simulación se encuentra disponible [en este link](#)

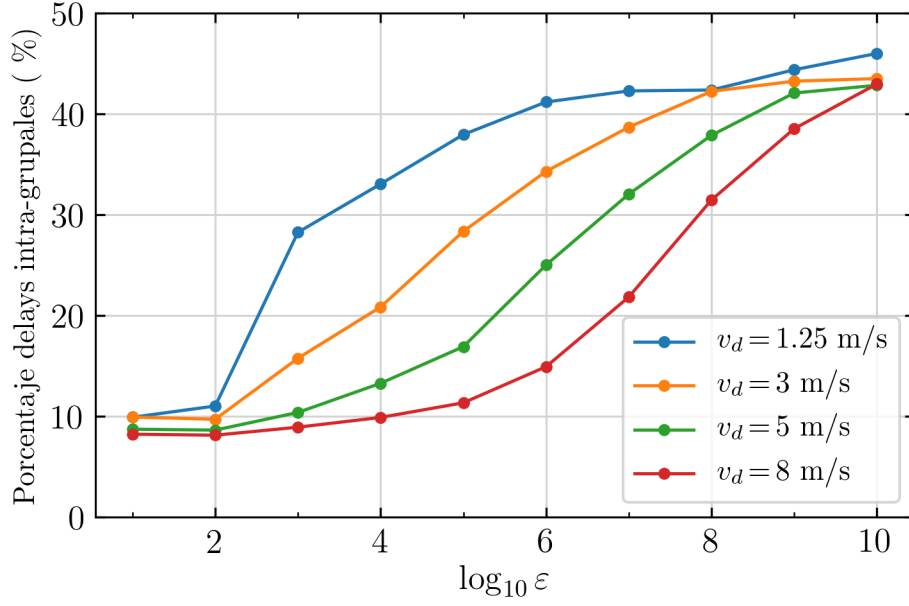


Figura 5.15: Porcentaje de *delays secuenciales* que corresponden a un “*delay* de dúo”, es decir, en que los dos integrantes de un dúo evacúan consecutivamente. Este es el resultado de promediar 100 iteraciones.

Observando cada curva con $v_d = cte$, el porcentaje de dúos que evacúan consecutivamente aumenta a medida que aumenta el nivel de intensidad de la fuerza de atracción (ϵ). Este es un comportamiento esperable ya que al mantener constante el nivel de ansiedad, un aumento en la intensidad de la atracción provoca que los vínculos tengan menor probabilidad de romperse. En particular, en el caso $\epsilon = 10^{10}$ N, el porcentaje de *delays intra-grupales* supera el 40 %, acercándose a una evacuación “idealmente ordenada”, independientemente del nivel de ansiedad.

Por el contrario, puede apreciarse que al aumentar v_d , para un ϵ fijo, el porcentaje decrece aún dentro de la sección *faster is faster* ($v_d > 5$ m/s). Esto significa que en la evacuación se separan más los grupos a medida que aumenta v_d , independientemente del comportamiento del tiempo de la evacuación, e indica que un alto nivel de *clusterización* separa o “desordena” la salida de dúos.

Por otra parte, se observa que la mayor discrepancia entre las curvas sucede en la región de ϵ correspondiente a los *colegas* ($\epsilon < 10^6$ N) indicando que las *parejas* tenderán siempre a salir más ordenadamente.

5.4.4. Conclusiones preliminares sobre el análisis de *delays*

En esta sección se analizó en detalle cómo se modifica la dinámica de las evacuaciones de emergencia al considerar la existencia de grupos sociales de dos personas (dúos). Se observó

que el tiempo de evacuación varía según la intensidad de nivel afectivo de los dúos, y lo hace de forma muy particular: puede seguir un comportamiento *closer is slower* o *closer is faster*.

Se analizaron los *delays intra-grupales* y los *delays secuenciales*. Los delays intra-grupales son largos para $\epsilon < 10^{7.5}$ N (*colegas* y *parejas afectivas*), y más cortos para ϵ mayor (*parejas íntimas*). Esto se debe a la “rotura” del vínculo antes de salir, o bien, a que el primero en salir espera a su pareja a la salida. Se investigó en detalle esto último, y se observó un fenómeno interesante: si los lazos afectivos son altos (aunque no íntimos) las parejas no se “rompen”, pero sí se “desordenan” a la salida. Es decir, entre un miembro del dúo y el siguiente se “cuela” otra persona que intenta salir. Si el dúo corresponde a una *pareja íntima* ($\epsilon > 10^{7.5}$ N) esto no ocurre.

Por otro lado, se encontró una diferencia significativa en el comportamiento de los *delays secuenciales* según su duración: los “cortos” permanecen aproximadamente constantes ante variaciones de ϵ , los “medianos” tienen un máximo en la sección *closer is faster* y los “largos” en la sección *closer is slower*. La transferencia de tiempo de los *delays* largos hacia los medianos produce un decaimiento en el tiempo de evacuación.

Habiendo estudiado los cambios en una evacuación, se analizarán los cambios que se producen en el diagrama fundamental por la presencia de grupos. Se verá si los efectos *closer is slower* y *closer is faster* siguen estando presentes al analizar otro tipo de geometría, como es el caso del pasillo con condiciones de contorno periódicas.

5.5. Diagrama fundamental con presencia de grupos sociales

En la figura 5.16 se observa, a modo de ejemplo, un instante de una simulación en el pasillo, en las condiciones en las que se realizaron todas las simulaciones. El pasillo es de 22 metros de ancho, y 28 metros de largo con condiciones de contorno periódicas. La multitud está compuesta en un 70 % por dúos. La simulación completa se puede ver [en este link](#).

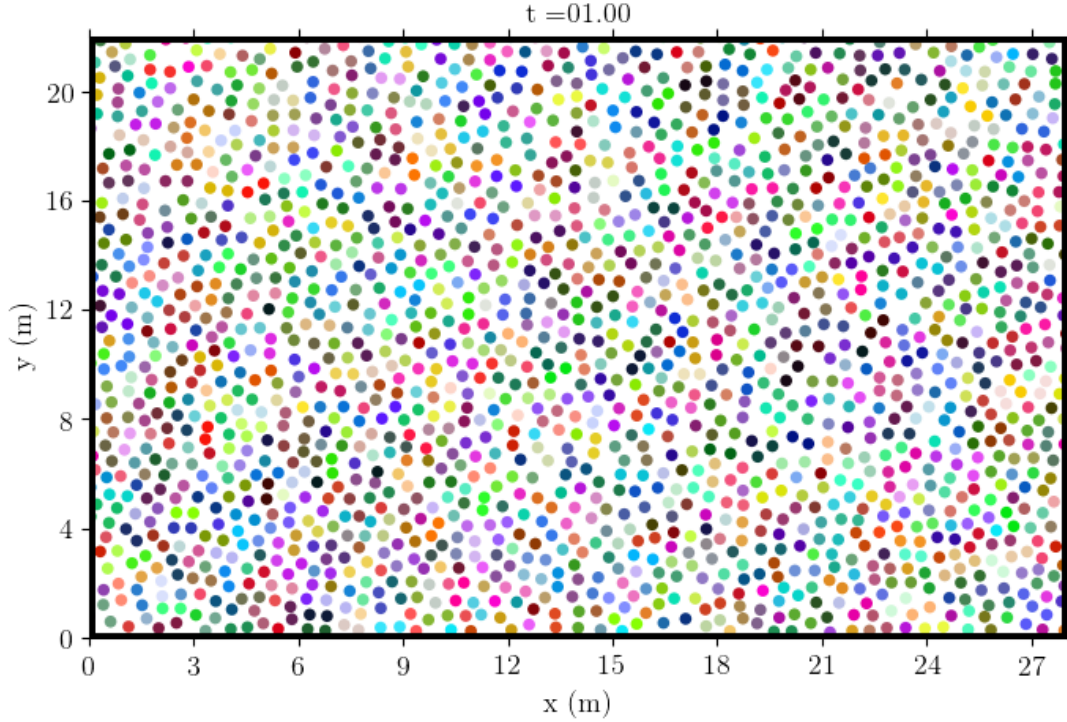


Figura 5.16: Instante de una simulación en un pasillo de 22 metros de ancho y 28 metros de largo con condiciones de contorno periódicas. El 70 % de las personas forman parte de un dúo, cada dúo se representa con un color distinto y todos los dúos tienen $\epsilon = 10^5$ N. La densidad global en el pasillo es de $\rho = 3P/M^2$. La simulación completa se puede ver [en este link](#).

El diagrama fundamental medido en el pasillo ilustrado se observa en la figura 5.17. Cada punto relaciona la densidad global en el pasillo y el flujo de peatones en el centro del mismo (ver figura 2.5). En cada simulación ϵ es el mismo para todos los dúos.

Al aumentar ϵ , el flujo sigue un comportamiento cualitativamente similar, aunque finalmente alcanza un valor menor. Estos pequeños cambios en el régimen congestionado hacen que el flujo se asemeje en mayor medida al medido empíricamente. Este comportamiento se explica al ver el perfil de velocidades de la figura 5.18, en el que se muestra la velocidad en la dirección paralela al pasillo en función de la coordenada transversal al mismo.

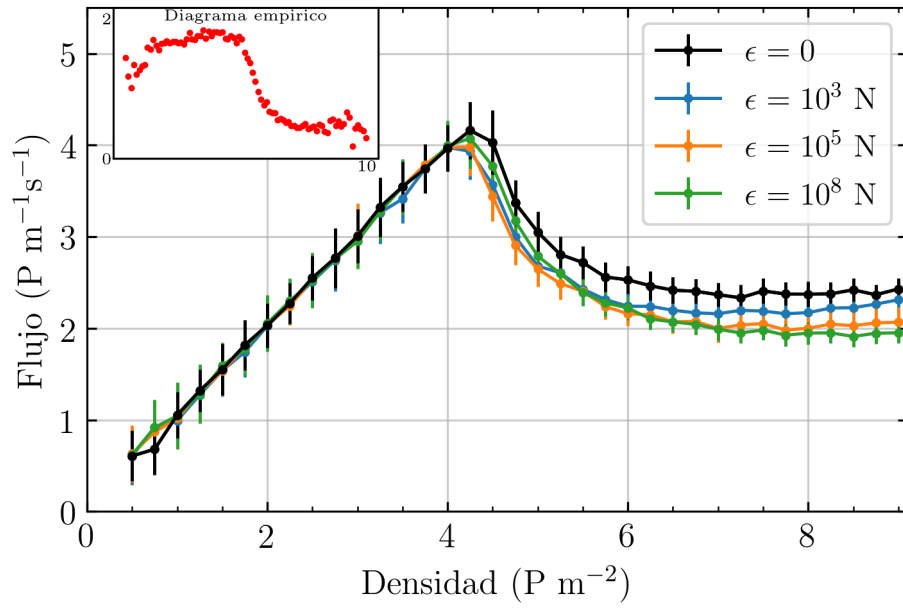


Figura 5.17: Diagrama fundamental medido en un pasillo de 22 m de ancho, y 28 m de largo con condiciones periódicas. El 70 % de los individuos forma parte de un dúo. $\epsilon=0$ es equivalente a considerar que no hay grupos en la multitud. También se muestra el diagrama fundamental empírico obtenido en el puente de Jamaraat [18]. El coeficiente de fricción utilizado fue $\kappa = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

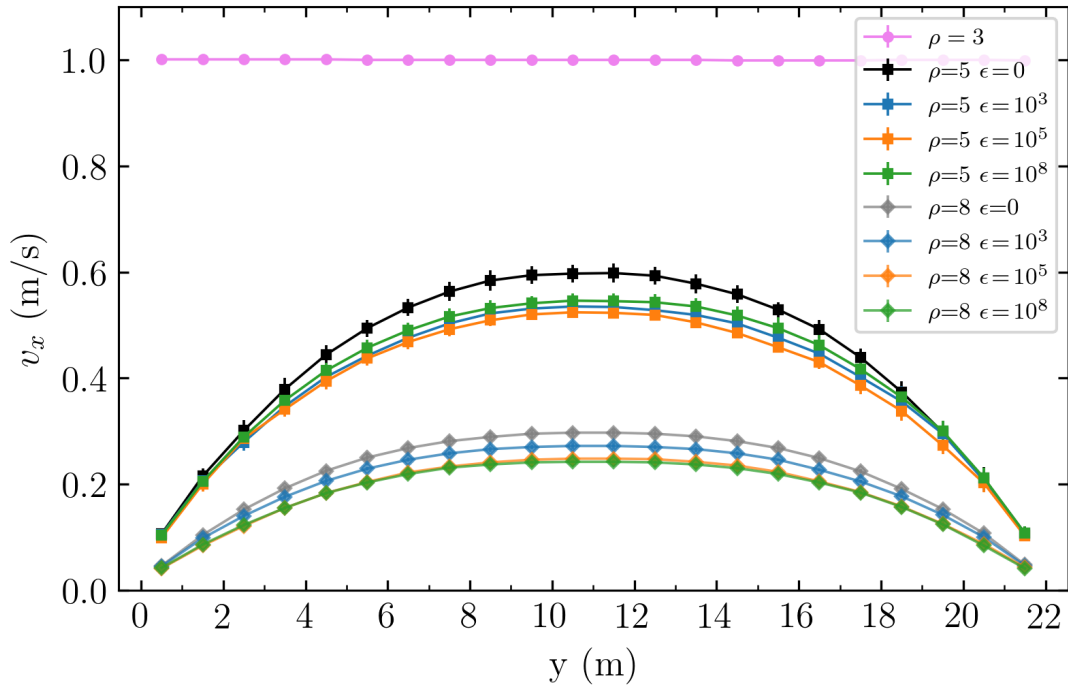


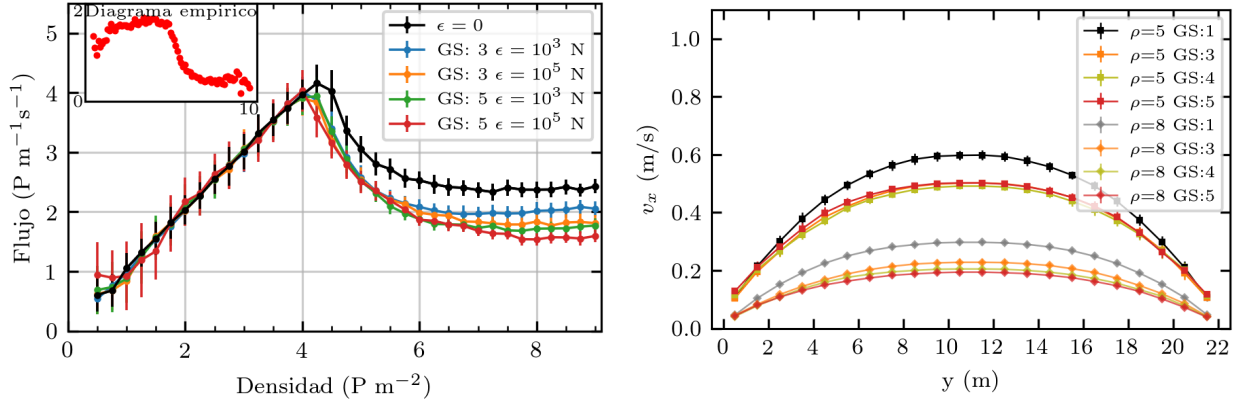
Figura 5.18: Perfil de velocidades para distintos valores de ρ (P/m^2) y ϵ (N), en un pasillo cuyas paredes se encuentran en $y = 0$ e $y = 22$ m y condiciones de contorno periódicas en x . El 70 % de los individuos forman parte de un dúo. El perfil de velocidad para $\rho = 3 \text{ P/m}^2$ es idéntico para todos los ϵ .

En el régimen de libre circulación, independientemente de ϵ , todas las personas se mueven acorde a su velocidad de deseo ($v_x = v_d = 1$ m/s) y eso provoca el crecimiento lineal del flujo en función de la densidad, como se define en la Ec. 2.10. A medida que el sistema se congestiona, la fricción provoca una ralentización de los individuos. En concreto, el rozamiento con las paredes (y entre individuos) genera un perfil de velocidades con forma de parábola, o dicho de otro modo, cuanto más cerca se esté de una pared más lento se irá y en consecuencia la velocidad máxima se obtendrá en el centro del pasillo. Este resultado es similar al observado en flujos laminares y se ha observado en eventos multitudinarios reales [36].

Al variar ϵ se observan diferentes comportamientos. Para $\rho = 5$ P/m², se obtiene la velocidad mínima con $\epsilon = 10^5$ N, una intermedia con $\epsilon = 10^3$ N y la máxima con $\epsilon = 10^8$ N. Esto es similar a los regímenes de *closer is slower* y *closer is faster* (ver secciones 5.2 y 5.3), aunque las causas no son necesariamente las mismas. Por el contrario, para $\rho = 8$ P/m², se tiene el comportamiento *closer is slower* siempre, pues siempre que se aumenta ϵ se miden velocidades menores. En el Apéndice C se presenta un análisis para explicar esta diferencia en la dependencia de ϵ para distintas densidades. Esencialmente, allí se muestra que el porcentaje de grupos que permanecen en contacto varía significativamente según la densidad, por lo que dependiendo de la densidad pueden hallarse ambos efectos o sólo uno de ellos.

También se exploraron los casos en que el 70 % de las personas agrupadas se juntan en grupos de hasta 5 personas. Los resultados se muestran en la figura 5.19.a.

Cuando se consideran intensidades afectivas menores a las asociadas a las *parejas íntimas* ($\epsilon < 10^{7.5}$ N), los resultados son similares a los observados anteriormente. Aunque se ve que cuanto más se aumenta la cantidad de personas por grupo más decrece la velocidad, como se observa en la figura 5.19.b, no se ven mayores cambios cualitativos significativos.



(a) Diagrama fundamental

(b) Perfil de velocidades

Figura 5.19: Diagrama fundamental y perfil de velocidades en un pasillo con presencia de grupos sociales. El 70 % de los individuos forma parte de un grupo. GS es un acrónimo de *Group Size* e indica el tamaño de los grupos en cada simulación. En la figura (b) se mantiene $\epsilon = 10^5$ N en todas las curvas.

En la figura 5.20 se muestra el diagrama fundamental para una intensidad afectiva alta, de $\epsilon = 10^8$ N. En este caso se obtienen comportamientos cualitativamente distintos.

El régimen de libre circulación se extiende hacia densidades mayores y alcanza valores superiores incluso a los observados sin presencia de grupos. Esto ocurre por la fuerte atracción que sienten entre sí los individuos, que provoca que se encuentren permanentemente en contacto, ligeramente comprimidos, y ocupan menos espacio efectivo. La fricción con integrantes de otros grupos se reduce y el régimen de libre circulación, en el cual el flujo crece, se extiende hacia densidades más altas. Además, aumentar el tamaño del grupo equivale a que haya menos grupos, por lo que más reducida se verá la fricción entre distintos grupos.

Sin embargo, cuando se alcanza el régimen congestionado, el flujo decrece por debajo del mínimo observado sin la presencia de grupos, e incluso por debajo del observado con grupos de menor ϵ (figura 5.19.a). Esto puede explicarse teniendo en cuenta que al estar dividida en grupos, la multitud presenta mayores inhomogeneidades y el flujo se encuentra más desordenado, efecto que entorpece la circulación. Para ilustrar lo mencionado, el perfil de velocidades para $\rho = 4.5 \text{ P/m}^2$, que es una densidad de transición entre el régimen de libre circulación y el congestionado, se observa en la figura 5.21.

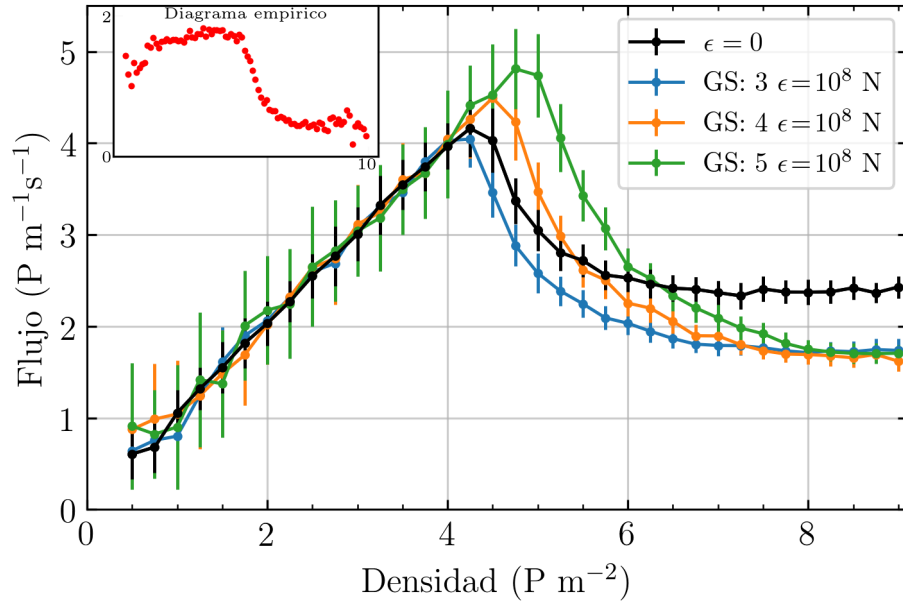


Figura 5.20: Diagrama fundamental con presencia de grupos sociales. El 70 % de los individuos forma parte de un grupo con $\epsilon = 10^8$ N, que es una intensidad atractiva elevada. GS es un acrónimo de *Group Size* e indica el tamaño de los grupos en cada simulación. $\epsilon=0$ es equivalente a considerar que no hay grupos en la multitud.

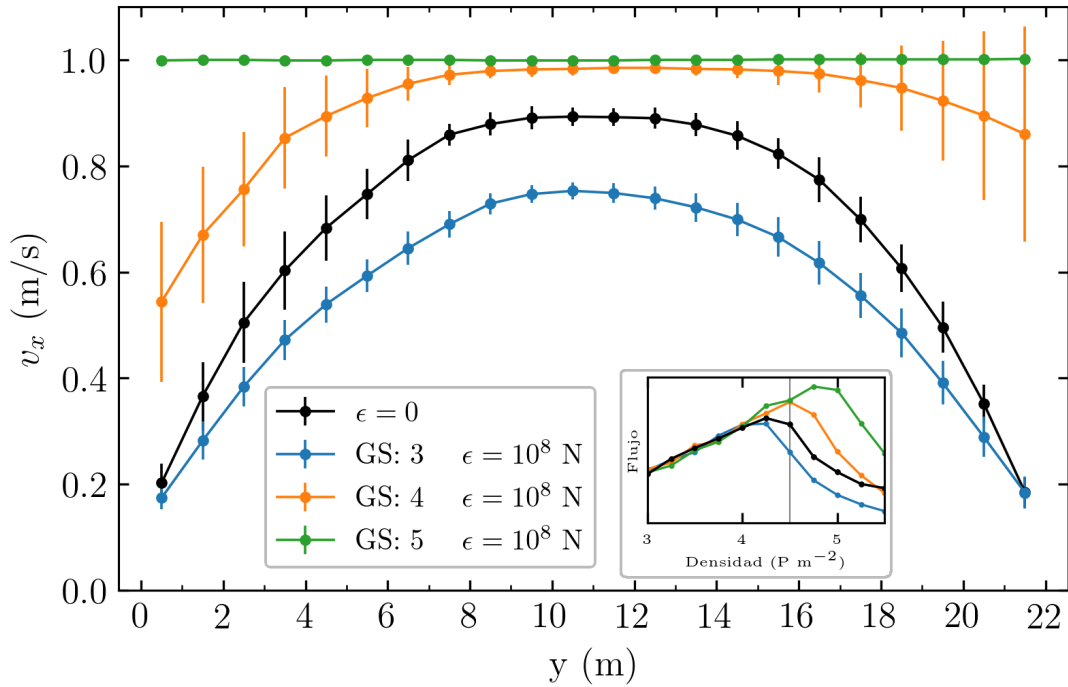


Figura 5.21: Perfil de velocidades para $\rho = 4.5$ P/m² en un pasillo cuyas paredes se encuentran en $y = 0$ e $y = 22$ m y condiciones de contorno periódicas en x . El 70% de los individuos forman parte de un grupo de tamaño GS, e intensidad afectiva $\epsilon = 10^8$ N. Se muestra también como referencia el diagrama fundamental en las cercanías de $\rho = 4.5$ P/m².

Debido a que en $\rho = 4.5 \text{ P/m}^2$ el diagrama fundamental es cualitativamente distinto según el tamaño de los grupos, el perfil de velocidades observado también muestra comportamientos distintos dependiendo del tamaño de los grupos:

- Como en $\rho = 4.5 \text{ P/m}^2$ el diagrama sin grupos y con grupos de 3 personas se encuentra en el régimen congestionado (curva negra y celeste, respectivamente), el perfil de velocidades tiene forma parabólica, similar al de un flujo laminar.
- Con grupos de 5 personas (curva verde), el sistema se encuentra en el régimen de libre circulación, por lo que los individuos transitan con su velocidad deseada $v_x = v_d$.
- En el caso de grupos compuestos por 4 personas (curva naranja), en el que el sistema se encuentra en la transición entre ambos estados, el perfil de velocidades se encuentra en un estado intermedio entre una recta y una parábola.

En conclusión, el diagrama fundamental se ve notablemente afectado por la presencia de grupos, y el flujo varía según la intensidad afectiva y el tamaño de los grupos. En algunos casos, estas variaciones modifican la densidad a la que ocurre la transición entre el régimen de libre circulación y el régimen congestionado. En todos los casos, el flujo para las densidades más altas ($\rho > 8 \text{ P/m}^2$) es menor que el que se observa sin la presencia de grupos, como se explica en el Apéndice C.

Capítulo 6

Conclusiones

En esta tesis se estudió cómo afecta la presencia de grupos sociales en la dinámica de multitudes. Se añadió al Modelo de Fuerza Social (SFM) una fuerza de atracción para dar cuenta de los lazos afectivos, y se la calibró con datos experimentales. Luego, se estudiaron dos escenarios muy distintos: la evacuación de una multitud a través de una salida angosta, y la dinámica de una multitud a lo largo de un pasillo ancho. En el primer escenario, se analizaron los distintos tipos de *delays* debidos (o no) a los lazos afectivos entre dúos y su efecto sobre el tiempo de evacuación de la multitud. En el segundo escenario, se analizó cómo se modifica el diagrama fundamental al considerar la existencia de grupos en la multitud. Se investigó también cómo se modifica este diagrama según el tamaño de los grupos y la intensidad de los vínculos afectivos y se analizaron los perfiles de velocidades.

En primer lugar, se implementó un potencial afectivo tipo Fermi (véase [27]) que permitió fijar una distancia de equilibrio entre los miembros de un dúo. Ésta representa un equilibrio entre los efectos de la “repulsión social” (que impide invasión de la esfera de privacidad) y la tendencia al acercamiento afectivo (según la intensidad del vínculo afectivo ϵ). Luego, al comparar estas distancias con datos experimentales, se pudieron definir intervalos de ϵ que corresponden a distintas categorías afectivas:

colegas ($\epsilon < 10^6$ N), *parejas afectivas* (10^5 N $< \epsilon < 10^{7.5}$ N) y *parejas íntimas* ($\epsilon > 10^{7.5}$ N).

En el escenario de evacuación a través de una salida angosta, se observó que los efectos *faster is slower* y *faster is faster*, que ocurren cuando se varía la velocidad de deseo (es decir, el nivel de ansiedad) de los peatones, siguen estando presentes al incluir grupos sociales. Además, se observaron fenómenos análogos al variar la intensidad de los lazos afectivos de los dúos (ϵ), a los que se denominó *closer is slower* y *closer is faster*, respectivamente. El efecto *closer is slower* indica que la presencia de dúos con una intensidad afectiva correspondiente al intervalo de

colegas evacúan más lentamente que si no existieran estos lazos. Cuanto mayor es el lazo afectivo (*closer*), más demora la evacuación (*slower*). Por el contrario, si los vínculos corresponden a la categoría de *parejas íntimas*, cuanto mayor es la intensidad afectiva más disminuye el tiempo de evacuación (*closer is faster*).

Se realizó un análisis de *delays* para comprender los fenómenos *closer is slower* y *closer is faster* en una escala microscópica. Es importante notar que la dinámica de los grupos ocurre en un contexto de *clusterización* en la salida, o en otras palabras, se forman estructuras que bloquean la salida (*blocking clusters*), más allá de la existencia o no de grupos sociales (para mayores referencias sobre la dinámica de *clusterización* sin la inclusión de grupos véase [30]). Teniendo esto en cuenta, a partir del análisis de *delays* se concluyó lo siguiente:

- En este contexto juega un rol relevante el nivel de ansiedad de los individuos. A medida que la ansiedad aumenta (cuanto mayor es v_d), los dúos se “rompen” con mayor facilidad, favoreciendo el “desorden” de las evacuaciones.
- Analizando los *delays secuenciales* (aquellos entre dos individuos cualesquiera), se observó que los *delays* largos en el intervalo *closer is slower* aumentan. Mientras tanto, en el intervalo *closer is faster* los *delays medianos* son los que en mayor medida contribuyen al tiempo de evacuación, indicando que los *clusters* se desarticulan con mayor facilidad.
- Estudiando los *delays* intra-grupales se encontró que un gran porcentaje de éstos son más largos en la sección de *colegas* y *parejas afectivas*, mientras que son más cortos en el intervalo de *parejas íntimas*, y se observó que esto se debe a las roturas de los dúos en las cercanías de la puerta.
- Se observó que si los lazos afectivos son altos, aunque no íntimos, los vínculos no se rompen aunque sí se “desordenan” a la salida. Esto propicia una salida “desordenada” e incrementa las demoras en la evacuación, porque al acercarse a la salida se encuentran personas ajenas “intercaladas” entre ambos miembros de un dúo. Por el contrario, si la intensidad afectiva es muy alta (*parejas íntimas*) los vínculos no se rompen, y ambos miembros tienden a salir juntos.

Por último, se midió el diagrama fundamental variando la cantidad de personas por grupo y la intensidad de los lazos afectivos. En el caso de los dúos, dentro de las densidades correspondientes al régimen congestionado, al variar ϵ se encontraron comportamientos similares a los hallados en las evacuaciones de emergencia: para densidades no tan altas se observaron los efectos del tipo *closer is slower* y *closer is faster* dependiendo de la intensidad afectiva ϵ ; por

el contrario, para densidades muy altas, sólo se observó el efecto tipo *closer is slower*. Cabe destacar que los efectos no tienen el mismo origen que los observados en evacuaciones, ya que no se explican por el comportamiento de los *blocking clusters*. Sin embargo, sus consecuencias son similares, por lo que en el escenario del pasillo se los identifica como fenómenos análogos. Al considerar grupos de mayor cantidad de personas y con intensidades afectivas elevadas ($\epsilon = 10^8$ N), el régimen de libre circulación se extendió hacia densidades mayores, y el flujo en el régimen congestionado se ralentizó en mayor medida.

Observaciones finales

Como conclusión final, se observó que la inclusión de grupos sociales en una multitud empeora la circulación para todo valor de la intensidad de los vínculos afectivos. En el escenario de evacuaciones por puertas angostas, esto se refleja en el aumento del tiempo de evacuación, mientras que en el escenario de pasillo amplio queda evidenciado por la reducción del flujo en el régimen congestionado. Sin embargo, este entorpecimiento de la circulación no es aleatoria ni es igual para toda intensidad afectiva. Por el contrario, se encontraron efectos que dominan la dinámica y se denominaron *closer is slower* y *closer is faster* en los cuales aumentar la intensidad afectiva perjudica o beneficia relativamente la circulación de la multitud, respectivamente.

Perspectivas a futuro

Conocer las propiedades de los grupos dentro de una población mejorará significativamente la capacidad de modelar su comportamiento. Identificar el porcentaje de personas que forman parte de un grupo, la cantidad de personas por grupo o el porcentaje de *colegas*, *parejas afectivas* e *íntimas* dentro de la población ayudará significativamente a describir su dinámica.

Como se vio en esta investigación, la inclusión de grupos sociales puede cambiar notablemente los efectos estudiados únicamente con individuos no agrupados. Por eso, una posible dirección para continuar este estudio es analizar la inclusión de grupos sociales en combinación con otros fenómenos ya estudiados en la literatura, como por ejemplo las evacuaciones con obstáculos, con baja visibilidad (por presencia de humo), o la modificación de la geometría del recinto a evacuar (como las dimensiones de la puerta o considerar dos puertas contiguas). Todos estos fenómenos pueden contribuir a una mayor separación o “desorden” de los dúos u otros comportamientos más complejos.

También se espera profundizar en el estudio de las densidades que permiten la coexistencia de los efectos *closer is slower* y *closer is faster* al variar ϵ en el escenario de pasillos anchos. Resultaría interesante analizar qué porcentaje de los grupos favorecen cada efecto y cuáles son

los intervalos de ϵ que corresponden a cada uno.

Además, podrían realizarse simulaciones en las que los grupos no se atraigan todos con igual ϵ , sino que éste provenga de una distribución de probabilidades. Dependiendo de cada situación, podrían considerarse distintas distribuciones. Por ejemplo, en la evacuación de una oficina laboral, los grupos serían mayormente de colegas, mientras que en la evacuación de un teatro habría mayor diversidad ya que habría tanto colegas como parejas afectivas y parejas íntimas.

Apéndice

Apéndice A

Fuerzas cerca del equilibrio

En situaciones de densidades relativamente bajas, en las que aproximadamente cada persona interactúa únicamente con su pareja al estar lo suficientemente lejos del resto de los peatones, la interacción se da por medio de la fuerza social (Ec. 2.2) y la fuerza de atracción (Ec. 2.6). La fuerza de rozamiento (Ec. 2.3) es nula pues no hay rozamiento tangencial dentro de la pareja.

Por lo tanto, se pueden considerar sistemas de dos personas, en los que la suma de las fuerzas en la dirección que las une es $F_s(d_{12}) + F_a(d_{12})$, cuyo gráfico para distintas intensidades de la atracción ϵ se observa en la figura A.1. La raíz del gráfico es la distancia de equilibrio entre los dos individuos: si $d_{12} < d_{eq}$ la fuerza es positiva y si $d_{12} > d_{eq}$ la fuerza es negativa. Dicho de otro modo si están más cerca sentirán una fuerza neta repulsiva y si están más lejos una fuerza neta atractiva.

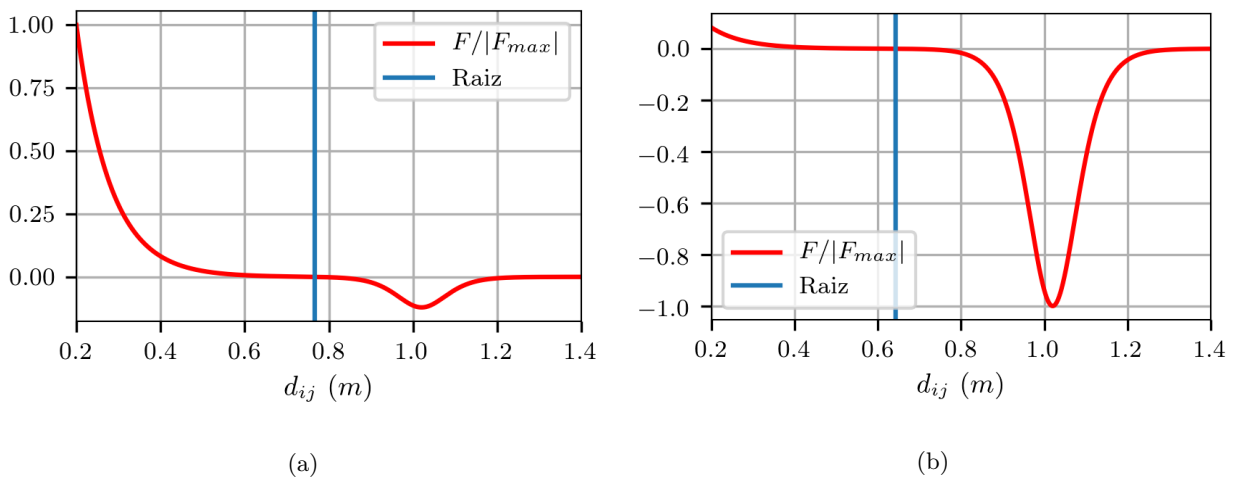


Figura A.1: Gráfico de la suma de la fuerza social y de atracción. En azul se grafica el valor de d_{ij} en el cual la suma de fuerzas se anula. (a) $\epsilon = 10^3$ N. (b) $\epsilon = 10^5$ N.

Este comportamiento puede aproximarse como un movimiento oscilatorio armónico

$$F_s(d_{12}) + F_a(d_{12}) \simeq -k(d_{12} - d_{eq}) \quad \text{si } |d_{12} - d_{eq}| \ll 1 \quad (\text{A.1})$$

Este k dependerá de los parámetros que modulan la intensidad de las fuerzas, como A y ϵ .

Además de las fuerzas de interacción, cada individuo se acelera por su fuerza de deseo (Ec. 2.1). La velocidad de deseo $\mathbf{v}_d = v_d \hat{\mathbf{e}}_d$ puede considerarse idéntica para ambos individuos si v_d lo es —tienen el mismo nivel de ansiedad— y $\hat{\mathbf{e}}_d$ lo es —desean moverse en la misma dirección—. Esto sucede en pasillos y caminos rectos, o en evacuaciones si la distancia entre el grupo y la salida es mucho mayor a la distancia entre los individuos del grupo.

Así, las ecuaciones de movimiento para ambas personas son

$$\begin{aligned} m\ddot{\mathbf{r}}_1 &= \mathbf{F}_a^{12} + \mathbf{F}_s^{12} + \mathbf{F}_d^1 \simeq -k(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| - d_{eq}) \hat{\mathbf{r}}_{12} + m \frac{\mathbf{v}_d - \dot{\mathbf{r}}_1}{\tau} \\ m\ddot{\mathbf{r}}_2 &= \mathbf{F}_a^{21} + \mathbf{F}_s^{21} + \mathbf{F}_d^2 \simeq k(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| - d_{eq}) \hat{\mathbf{r}}_{12} + m \frac{\mathbf{v}_d - \dot{\mathbf{r}}_2}{\tau} \end{aligned}$$

Al restarlas, se obtiene

$$m(\ddot{\mathbf{r}}_1 - \ddot{\mathbf{r}}_2) \simeq -2k(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| - d_{eq}) \hat{\mathbf{r}}_{12} + m \frac{\dot{\mathbf{r}}_2 - \dot{\mathbf{r}}_1}{\tau}$$

Si $\mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$, y $\omega^2 \equiv 2k/m$,

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\omega^2(|\mathbf{r}| - d_{eq})\hat{\mathbf{r}} - \frac{1}{\tau} \dot{\mathbf{r}} \Rightarrow \boxed{\ddot{\mathbf{r}} + \frac{1}{\tau} \dot{\mathbf{r}} + \omega^2 \mathbf{r} = \omega^2 d_{eq} \hat{\mathbf{r}}} \quad (\text{A.2})$$

Esta es la ecuación de un movimiento armónico amortiguado en dos dimensiones, con frecuencia ω , tiempo de decaimiento 2τ , y longitud de equilibrio d_{eq} . En otras palabras, aunque al comenzar los integrantes de un dúo se encuentren a una distancia distinta a la distancia de equilibrio, en un tiempo del orden de 2τ la alcanzan y por lo tanto este comportamiento no afecta a la dinámica de la evacuación.

En efecto, en la figura A.2 se observa la distancia entre los dos integrantes de un dúo en función del tiempo, resultado de una simulación en la que comienzan a una distancia de separación de 0.84 m. La intensidad de la atracción del dúo es $\epsilon = 10^5$ N, por lo que la distancia de equilibrio se corresponde con la resaltada en la figura A.1.b.

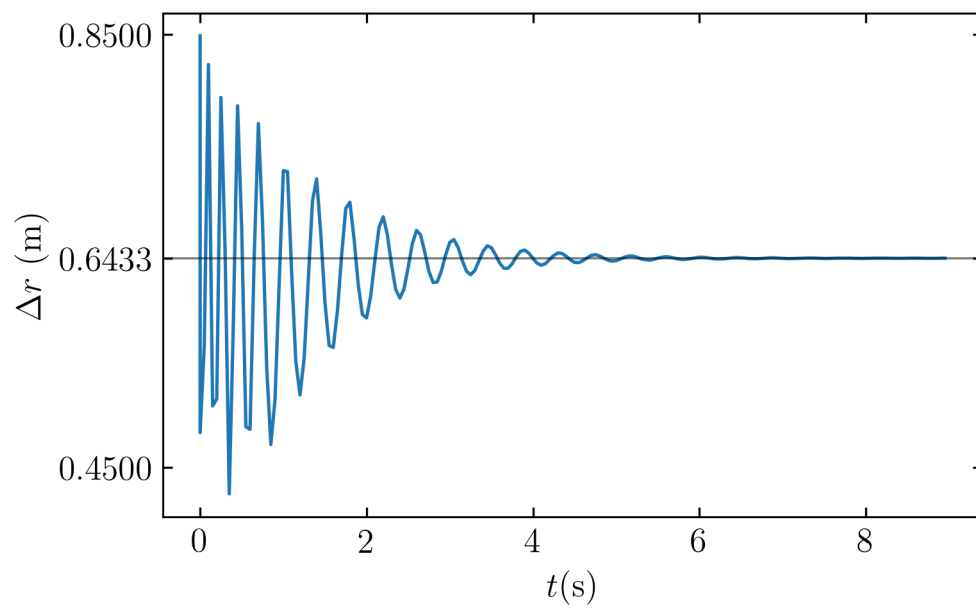


Figura A.2: Distancia de separación en una simulación computacional entre dos individuos que conforman un dúo. Se atraen con intensidad $\epsilon = 10^5$ N y la separación inicial es de 0.84 m.

Apéndice B

Evacuaciones con bajo nivel de ansiedad

En las evacuaciones con bajo nivel de ansiedad ($v_d < 1.5$ m/s), el tiempo de evacuación en función de ϵ aumenta abruptamente a partir de $\epsilon \simeq 10^8$ N. Esto se percibe en las figuras 5.5 y 5.12.a. Al observar videos de las simulaciones, se notó que a partir de ese valor de ϵ los dúos están en contacto y no se separan hasta que el primero logra evacuar del recinto. Uno de estos videos se puede observar [en este link](#).

Mientras que para v_d más altas el nivel de ansiedad elevado provoca que no queden espacios sin ocupar en las cercanías de la salida, para $v_d < 1.5$ m/s y $\epsilon \simeq 10^8$ N sí los hay. Esto es porque cada dúo prioriza moverse conjuntamente, en lugar de intentar acercarse a la salida ocupando cualquier espacio disponible. Un ejemplo de esta situación se observa en la figura B.1.

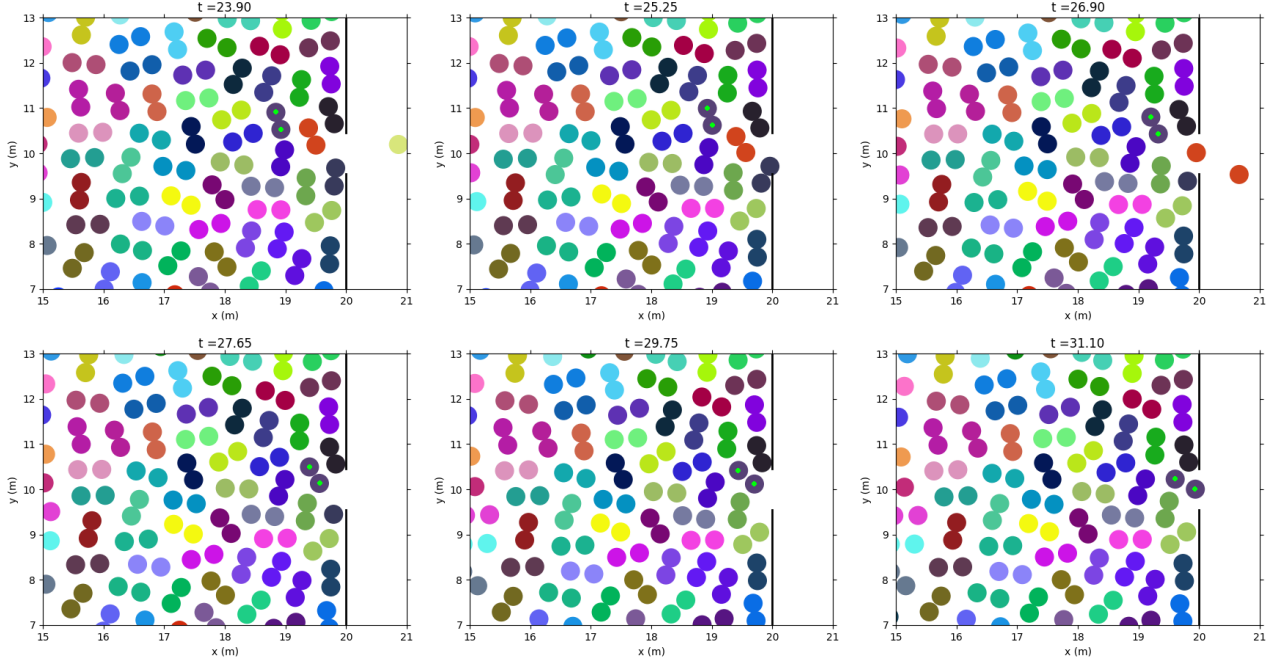


Figura B.1: Distintos momentos en la simulación de una evacuación de emergencia. En la secuencia de imágenes, se observa como el *duo violeta* remarcado con un *punto verde* se mueve rígidamente hacia la salida. Al contar con un muy bajo nivel de ansiedad, el resto de los dúos no intenta ocupar cada espacio vacío que se genera en las cercanías de la puerta. Un video completo de la simulación se encuentra disponible [en este link](#).

En la figura B.2 se grafica la fuerza de rozamiento \mathbf{F}_r (Ec. 2.3) total entre parejas en la cercanía de la salida para distintos valores de ϵ , siempre con $v_d = 1.25$ m/s. Se calculó \mathbf{F}_r únicamente entre miembros de un mismo dúo, y se sumó la fuerza obtenida para todos los dúos ubicados en un semicírculo de radio 1.5 m centrado en la puerta. Se midió a partir de $t = 15$ s, dejando intervalos de 3 segundos entre cada medición para evitar la correlación al medir, y se realizaron 10 iteraciones para cada valor de ϵ .

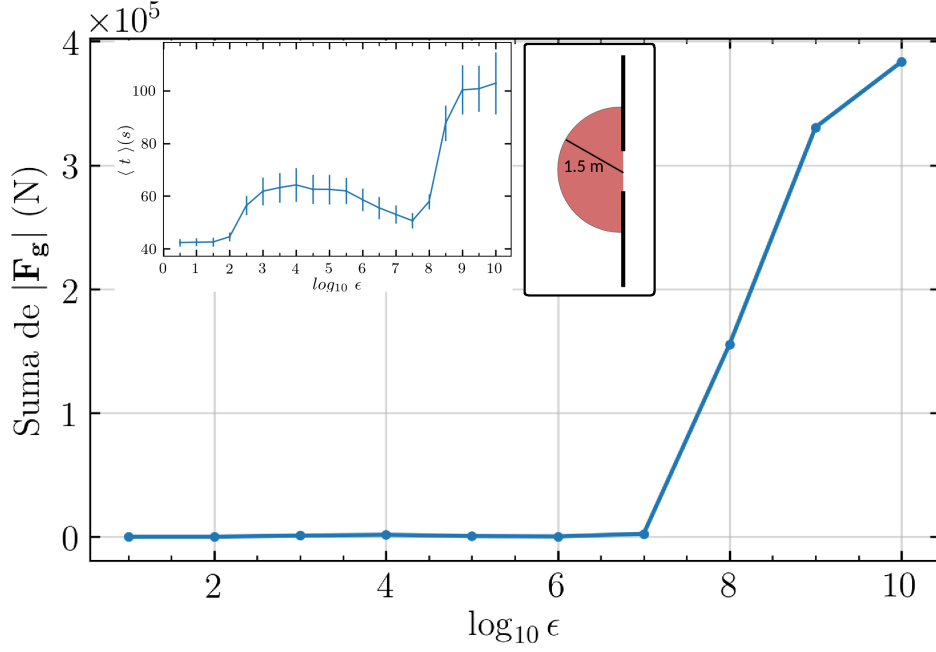


Figura B.2: Fuerza de rozamiento en función de ϵ en evacuaciones de emergencia con $v_d=1.25$ m/s. La fuerza se midió entre los dos integrantes de cada dúo en un semicírculo de radio 1.5 m centrado en la puerta, cada 3 segundos, y se sumó el resultado de cada dúo. También se muestra el tiempo de evacuación con $v_d=1.25$ m/s como referencia.

El rozamiento es nulo para $\epsilon \leq 10^7$ N, y luego aumenta abruptamente para $\epsilon > 10^7$ N. Este aumento abrupto coincide con el crecimiento repentino del tiempo de evacuación. Considerando que la fuerza es nula si los integrantes de los dúos no están en contacto, y que depende linealmente de su distancia si lo están (Ec 2.3), esto significa que con $v_d = 1.25$ m/s, en la región $\epsilon \simeq 10^7$ N todos los dúos pasan a estar en contacto. Por lo tanto, al contar con un nivel de ansiedad bajo y al estar todos los dúos permanentemente en contacto, la dinámica está dominada por comportamientos como el retratado en la figura B.1 que ralentizan la evacuación.

Apéndice C

Closer is slower y closer is faster en altas densidades

En los perfiles de velocidad dentro de un pasillo, se observan comportamientos diferentes al aumentar ϵ para distintas densidades. Esto se puede ver en la figura 5.18. En ella se comparan los perfiles de velocidad con $\epsilon = 10^3$, 10^5 y 10^8 N para dos densidades distintas. En el caso $\rho = 5$ P/m², la velocidad observada en el caso $\epsilon = 10^5$ N es menor que con $\epsilon = 10^3$ N, pero con $\epsilon = 10^8$ N se supera a los primeros dos. Esto muestra que en una región de ϵ se tiene un efecto similar al efecto *closer is slower* y en otra *closer is faster*. Por el contrario, si $\rho = 8$ P/m², siempre sucede que al aumentar ϵ disminuye la velocidad, por lo que se tiene *closer is slower* solamente.

El cambio se debe a que al aumentar la densidad, los dúos tienen más dificultad para permanecer unidos. Como se explica en la sección 5.3, siempre que los dúos permanezcan separados se generarán fuerzas atractivas que cuanto más intensas sean más entorpecerán la circulación (ver figura 5.7).

En la figura C.1 se grafica el porcentaje de individuos que tienen como persona más cercana a su compañero de dúo. Las mediciones se hicieron en un pasillo de las mismas características que en la sección 5.5. Cuando los dos integrantes de un dúo están en contacto entre sí y además con otras personas, la distancia entre ellos será menor que con el resto debido a la fuerza de atracción. Esto significa que cuando la persona más cercana a un individuo no es su compañero de dúo, éstos no se encuentran en contacto.

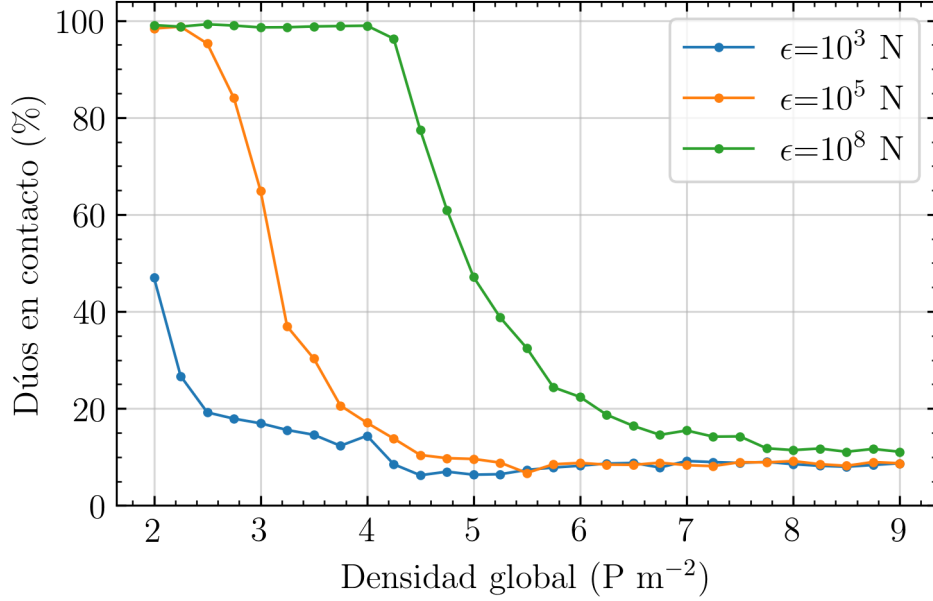


Figura C.1: Porcentaje de individuos que tienen como persona más cercana a su compañero de dúo. Las mediciones se hicieron en un pasillo de 22 m de ancho y 28 m de largo con condiciones periódicas de contorno. El 70 % de los individuos forma parte de un dúo. Se dejaron pasar 50 s antes de realizar la medición.

Al aumentar la densidad dejando ϵ constante, el porcentaje de dúos que permanecen unidos decrece. Se puede ver como para $\rho = 5$ P/m², con $\epsilon = 10^3$ y 10^5 N solamente el 10 % de los dúos se encuentran en contacto, mientras que para $\epsilon = 10^8$ N la cantidad se acerca al 50 %.

Esto muestra que para cada densidad hay una región de ϵ en la cual la mayoría de los dúos no logran mantenerse unidos, y otra región en la que sí. Esta diferencia lleva a comportamientos cualitativamente distintos. Al aumentar ϵ en la primera región, no se logra que un mayor porcentaje de dúos sobreviva, y la fuerza de atracción entorpece en mayor medida la circulación (ver figura 5.7), y por lo tanto se tiene el efecto *closer is slower*. En la segunda región, al aumentar ϵ crece el porcentaje de dúos que queda unido, por lo que decrece la cantidad de fuerzas que desordenan el sistema, y eso corresponde al efecto *closer is faster*.

Para la densidad $\rho = 5$ P/m², $\epsilon = 10^3$ y 10^5 N corresponden a la región con *closer is slower*, mientras que $\epsilon = 10^8$ N corresponde a la región *closer is faster*. De igual manera, para la densidad $\rho = 8$ P/m² el porcentaje de dúos que sobreviven es siempre menor al 20 %, por lo cual se tiene únicamente *closer is slower* para todo valor de ϵ .

Bibliografía

- [1] A. Raineri. “The Causes and Prevention of Serious Crowd Injury and Fatalities at Outdoor Music Festivals”. *12th Annual Safety Institute of Australia Conference* (2004).
- [2] Faisel T. Illiyas, Shibu K. Mani, A.P. Pradeepkumar y Keshav Mohan. “Human stampedes during religious festivals: A comparative review of mass gathering emergencies in India”. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 5, 10-18 (2013).
- [3] “Un asistente al recital encendió una bengala y desató el infierno Cromañón”. *La Capital* (2014).
- [4] “Puerta 12: Memorias del horror”. *Clarín* (2000).
- [5] “Un vídeo muestra imágenes inéditas y angustiosas de la avalancha vivida en el Madrid Arena”. *Antena 3* (2016).
- [6] G. A. Frank y C. O. Dorso. “Evacuation under limited visibility”. *International Journal of Modern Physics C* Vol 26, 1550005 (2015).
- [7] F. E. Cornes, G. A. Frank y C. O. Dorso. “High pressures in room evacuation processes and a first approach to the dynamics around unconscious pedestrians”. *Physica A* 484, 282-298 (2017).
- [8] G. A. Frank y C. O. Dorso. “Room evacuation in the presence of an obstacle”. *Physica A* 390, 2135-2145 (2011).
- [9] A. Schadschneider, H. Klüpfel, T. Kretz, C. Rogsch y A. Seyfried. “Fundamentals of pedestrian and evacuation dynamics”. *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*. IGI Global, 124–154, (2009).
- [10] D. Helbing, I. Farkas y T. Vicsek. “Simulating dynamical features of escape panic”. *Nature* 407, 487-490 (2000).
- [11] L.F. Henderson. “On the fluid mechanics of human crowd motion”. *Transportation Research* 8.6, 509-515 (1974).
- [12] A. Schadschneider. “Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Theory”. *arXiv preprint cond-mat/0112117* (2001).
- [13] A. Strachan y C. O. Dorso. “Fragment recognition in molecular dynamics”. *Physical Review C* 56, 995 (1997).
- [14] D. R. Parisi y C. O. Dorso. “Morphological and dynamical aspects of the room evacuation process”. *Physica A* 385, 343 - 355 (2007).

- [15] D. Helbing, I. Farkas, P. Molnár y T. Vicsek. "Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations". *Springer Pedestrian and Evacuation Dynamics* 322, 21-58 (2002).
- [16] I. M. Sticco, G. A. Frank, S. Cerrotta y C. O. Dorso. "Room evacuation through two contiguous exits". *Physica A* 474, 172-185 (2017).
- [17] R. Escobar y y A. D. Rosa. "Architectural Design for the Survival Optimization of Panicking Fleeing Victims". *Springer - Lecture Notes in Computer Science* 97-106 (2003).
- [18] D. Helbing, A. Johansson y H. Z. Al-Abideen. "Dynamics of crowd disasters: An empirical study". *Phys. Rev. E* 75-4, 046109 (2007).
- [19] I.M. Sticco, G.A. Frank, F.E. Cornes y C.O. Dorso. "A re-examination of the role of friction in the original Social Force Model". *Safety Science* 121, 42 - 53 (2020).
- [20] A. Bottinelli y J. L. Silverberg. "Can high-density human collective motion be forecasted by spatiotemporal fluctuations?" *arXiv* 1809.07875 (2018).
- [21] "Lo que se sabe de la trágica estampida en La Meca que dejó más de 700 muertos". *BBC News* (2015).
- [22] J. Was y K. Kulakowski. "Social Groups in Crowd". *Springer Network Data Collected via Web*, 1784-1790 (2014), págs. 1784-1790.
- [23] M. Moussaïd, N. Perozo, S. Garnier, D. Helbing y G. Theraulaz. "The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics". *PloS one* 5, e10047 (2010).
- [24] L. Huang, J. Gong, W. Li, T. Xu, S. Shen, J. Liang, Q. Feng, D. Zhang y J. Sun. "Social Force Model-Based Group Behavior Simulation in Virtual Geographic Environments". *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 79 (2018).
- [25] H. Singh, R. Arter, L. Dodd, P. Langston, E. Lester y J. Drury. "Modelling subgroup behaviour in crowd dynamics DEM simulation". *Applied Mathematical Modelling* 33.12, 4408 - 4423 (2009).
- [26] C. von Krüchten y A. Schadschneider. "Empirical study on social groups in pedestrian evacuation dynamics". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 475, 129 - 141 (2017).
- [27] G. A. Frank y C. O. Dorso. "Panic evacuation of single pedestrians and couples". *International Journal of Modern Physics C* 27(6), 1-16 (2016).
- [28] A. Schadschneider, J. Schmidt y V. Popkov. "When is a bottleneck a bottleneck?" *Springer International Publishing Traffic and Granular Flow '15'*, 403-410 (2016).
- [29] I. M. Sticco, F. E. Cornes, G. A. Frank y C. O. Dorso. "Beyond the faster-is-slower effect". *Phys. Rev. E* 96-5, 052303 (2017).
- [30] F. E. Cornes, G. A. Frank y C. O. Dorso. "Microscopic dynamics of the evacuation phenomena". 2007.06746 (2020).
- [31] F. Zanlungo, Z. Yucel y T. Kanda. "The effect of social roles on group behaviour". *Proceedings of the 8th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics* (2016).
- [32] D. Bršćić, F. Zanlungo y T. Kanda. "Density and Velocity Patterns during One Year of Pedestrian Tracking". *Transportation Research Procedia* Vol. 2, 77-86 (2014).

- [33] Z. Yucel, F. Zanlungo, C. Feliciani, A. Gregorj y T. Kanda. “Identification of social relation within pedestrian dyads”. *PLoS ONE* 14(10):e0223656 (2019).
- [34] S. Plimpton. “Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics”. *Journal of Computational Physics* 117 1-19 (1995).
- [35] D. Littlefield. “Metric handbook”. *Routledge* (2008).
- [36] “Empirical study of a unidirectional dense crowd during a real mass event”. *Physica A* 392.12, 2781-2791 (2013).

Tesis disponible bajo Licencia Creative Commons

Atribución – No Comercial – Compartir Igual

(by-nc-sa) 2.5 Argentina

Buenos Aires, 2020