



INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE BUENOS AIRES

72.25 - *Simulación de Sistemas*

---

**Social Force Model:  
Dinámica peatonal en los molinetes del tren**

---

*Nombre:*  
Bossi, Agustín Nicolás  
Diaz Kralj, Luciana

*Legajos:*  
57068  
60495

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Sistema real . . . . .	2
1.2. Modelo matemático . . . . .	3
<b>2. Implementación</b>	<b>5</b>
2.1. Tecnologías empleadas . . . . .	5
2.2. Diagrama UML . . . . .	5
2.3. Motor de la simulación . . . . .	6
<b>3. Simulaciones</b>	<b>7</b>
3.1. Observables . . . . .	7
3.2. Métricas . . . . .	8
3.3. Sistemas simulados . . . . .	8
3.3.1. Tiempo de transacción . . . . .	8
3.3.2. Altura de decisión . . . . .	8
3.3.3. Cantidad de peatones y molinetes . . . . .	9
<b>4. Resultados</b>	<b>11</b>
4.1. Tiempo de transacción . . . . .	11
4.1.1. Decisión por cercanía . . . . .	11
4.1.2. Decisión por disponibilidad . . . . .	14
4.2. Altura de decisión . . . . .	17
4.2.1. Decisión por cercanía . . . . .	17
4.2.2. Decisión por disponibilidad . . . . .	20
4.3. Cantidad de peatones y molinetes . . . . .	23
4.3.1. Decisión por cercanía . . . . .	23
4.3.1.1. Pocos molinetes ( $k = 5$ ) . . . . .	23
4.3.1.2. Muchos molinetes ( $k = 30$ ) . . . . .	26
4.3.2. Decisión por disponibilidad . . . . .	29
4.3.2.1. Pocos molinetes ( $k = 5$ ) . . . . .	29
4.3.2.2. Muchos molinetes ( $k = 30$ ) . . . . .	32
<b>5. Conclusiones</b>	<b>35</b>
5.1. Tiempo de transacción . . . . .	35
5.2. Altura de decisión . . . . .	35
5.3. Cantidad de peatones y molinetes . . . . .	35

## 1. Introducción

El estudio del comportamiento humano en entornos urbanos y de transporte es crucial para diseñar espacios seguros, eficientes y cómodos para los usuarios. En particular, la gestión de multitudes en áreas como las estaciones de tren es de suma importancia para garantizar una experiencia fluida y segura para los pasajeros. Los molinetes de estación de tren, utilizados para controlar el acceso y la salida de los usuarios, representan un punto crítico donde se producen interacciones sociales y dinámicas de multitudes.

El objetivo de este informe es investigar y analizar diferentes escenarios de comportamiento humano frente a molinetes de estación de tren utilizando el Social Force Model (SFM). El SFM es un modelo ampliamente utilizado en la simulación de multitudes y comportamiento colectivo, que se basa en principios físicos para predecir el movimiento de individuos en entornos sociales.

El SFM nos proporcionará un marco teórico y computacional para modelar y simular estas interacciones sociales, permitiendo evaluar el impacto de diferentes factores, como el diseño de los molinetes, la disposición del espacio y el comportamiento individual de los usuarios, en la dinámica de la multitud y la eficiencia del flujo de personas.

### 1.1. Sistema real

El sistema real que se busca analizar es la dinámica peatonal en un espacio cuadrado donde se disponen de forma equiespaciada cierta cantidad de molinetes, todos contando con un tiempo de transacción y ancho fijo. Los peatones circularán desde su ubicación inicial hacia los molinetes, con una velocidad inicial de 1 m/s.

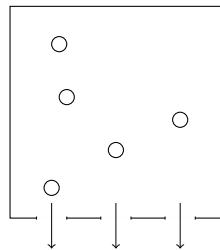


FIGURA 1.1: Geometría del sistema real.

## 1.2. Modelo matemático

El SFM considera que el movimiento de cada individuo se encuentra influenciado por una serie de fuerzas que representan no solo la interacción con otros individuos y el entorno, sino también las motivaciones internas que llevan a un individuo a realizar distintas acciones.

La ecuación de Newton para cada peatón “i” [1] es:

$$m_i \cdot \ddot{r}_i = F_{GRANULAR} + F_{SOCIAL} + F_{DESEO} \quad (1.1)$$

La **fuerza granular** es la de contacto, descrita por la ec. (1.2) y representada por la Fig. 1.2:

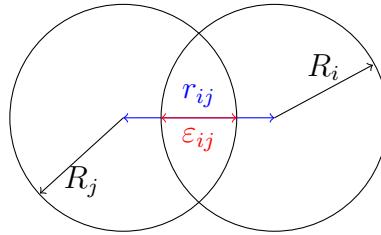


FIGURA 1.2: Fuerza de contacto (granular).

$$F_{Gi} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_p} [(-\varepsilon_{ij} \cdot k_n) \cdot e_{ij}^n + (\nu_{ij}^t \cdot \varepsilon_{ij} \cdot k_t) \cdot e_{ij}^t] g(\varepsilon_{ij}) \quad (1.2)$$

Siendo  $\varepsilon_{ij}$ :

$$\varepsilon_{ij} = r_{ij} - (R_i + R_j) \quad (1.3)$$

La **fuerza social** (Fig. 1.3) representa la influencia de las interacciones sociales en el movimiento de los peatones, y se calcula mediante la ec. (1.4).

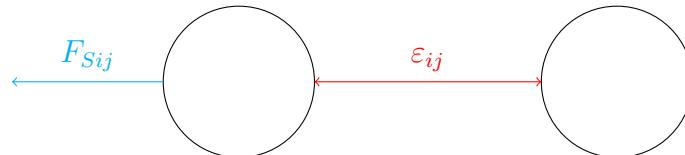


FIGURA 1.3: Fuerza social.

$$F_{Si} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_p} A \cdot \exp\left(\frac{-\varepsilon_{ij}}{B}\right) \cdot e_{ij}^n \quad (1.4)$$

Donde  $A$  es la constante que indica la intensidad de la fuerza de repulsión,  $B$  es la constante que representa qué tan rápido decrece la fuerza una vez que los individuos se alejan entre sí, y  $e_{ij}$  es la distancia entre dichos individuos.

Por último, la **fuerza de deseo** es la que impulsa al individuo hacia su objetivo, tal como se puede observar en la Fig. 1.4.

Está descrita por:

$$F_{Di} = m_i \cdot \frac{(\nu_{di} \cdot e_i^{target} - v_i)}{\tau_i} \quad (1.5)$$

Donde  $m_i$  es la masa del individuo,  $\nu_{di}$  es la velocidad deseada,  $e_i^{target}$  es la dirección que apunta al individuo hacia el target,  $v_i$  es la velocidad actual del individuo, y  $\tau_i$  es el tiempo característico.

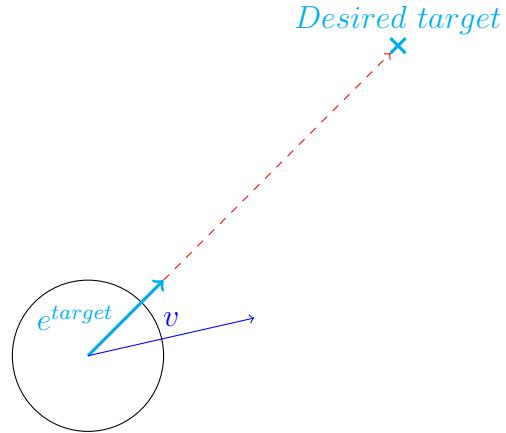


FIGURA 1.4: Fuerza de deseo.

Para discretizar las ecuaciones de movimiento por su desarrollo de Taylor, se utilizó el algoritmo de Verlet:

$$r_i(t + \Delta t) = 2r_i(t) - r_i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m_i} f_i(t) \quad (1.6)$$

$$v_i(t) = \frac{r_i(t + \Delta t) - r_i(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (1.7)$$

## 2. Implementación

### 2.1. Tecnologías empleadas

- **Java 11:** Simulación, input y output.
- **Python:** Post procesamiento, gráficos.
- **Ovito:** Visualización, animaciones.

### 2.2. Diagrama UML

A continuación se muestra el diagrama UML con las clases implementadas en Java para la simulación del sistema:



FIGURA 2.1: Diagrama de clases

### 2.3. Motor de la simulación

El siguiente diagrama refleja el proceso del motor de simulación durante una iteración:

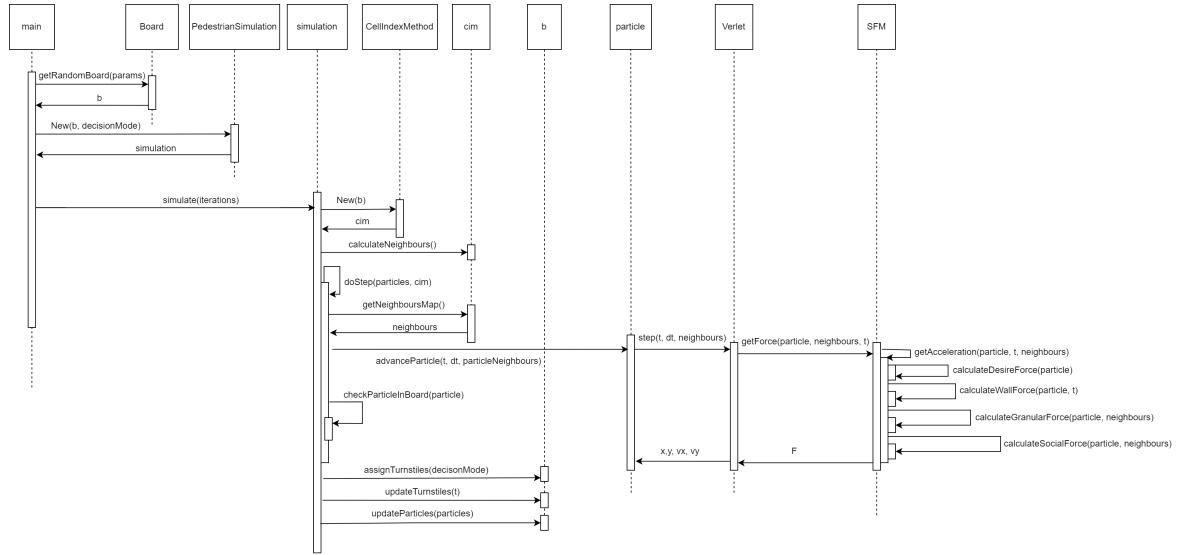


FIGURA 2.2: Motor de la simulación

### 3. Simulaciones

Para modelar el sistema se utilizó un espacio cuadrado de  $L \times L$  donde se disponen de forma equiespaciada  $k$  molinetes, cada uno contando con un tiempo de transacción  $t_t$  y ancho  $d$ .

En este entorno transitarán  $n$  peatones cuyas partículas tienen un radio entre  $r_{min}$  y  $r_{max}$  con masa  $m$  y velocidad inicial  $v_o = 1m/s$ . Los individuos se desplazarán desde cualquier punto de la habitación en dirección a los molinetes, y elegirán a cuál dirigirse en particular una vez dentro del área de altura  $h_d$ .

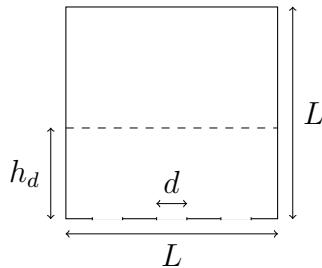


FIGURA 3.1: Geometría del sistema implementado.

Una vez llegado el momento de elegir el molinete, otra variable es el método de elección: por cercanía o por la disponibilidad del molinete.

#### 3.1. Observables

- **Descarga  $n(t)$ :** Cantidad acumulada de peatones que atravesaron los molinetes hasta el tiempo  $t$ .
- **Caudal  $Q(t)$ :**

$$Q(t) = \frac{n(t + W) - n(t)}{W} \quad (3.1)$$

Siendo  $W$  el tamaño de la ventana, para la que tomamos  $7.5s$ .

- **Densidad  $d(t)$ :**

$$d(t) = \frac{\# \text{ partículas en área A}}{A} \quad (3.2)$$

Donde el área  $A$  elegida comprende todo el ancho  $L$  y  $0.25 \cdot (L - 2m)$  de alto.

### 3.2. Métricas

- Caudal medio (1/s)
- Tiempo de escape (s)

### 3.3. Sistemas simulados

#### 3.3.1. Tiempo de transacción

Se tomaron diferentes valores para  $t_t$  manteniendo el resto de los parámetros fijos, en un escenario donde hay pocos molinetes. Se realizarán 5 ejecuciones para cada valor de  $t_t$  tomado, cada ejecución con un máximo de 15000 iteraciones. Esto se repetirá para ambos métodos de decisión: por disponibilidad y por cercanía.

**Inputs:**

- $t_t \in \{ 2s, 4s, 6s, 8s, 10s \}$
- Método de decisión  $\epsilon \{ \text{disponibilidad}, \text{cercanía} \}$

**Parámetros fijos:**

- $L = 50m$
- $h_d = 0.3 \cdot L = 15m$
- $d = 1.2m$
- $k = 5$  [*unidades de molinetes*]
- $n = 150$  [*unidades de peatones*]
- $r_{min} = 0.2m$
- $r_{max} = 0.5m$
- $m = 70kg$

#### 3.3.2. Altura de decisión

Se tomaron diferentes valores para  $h_d$  manteniendo el resto de los parámetros fijos, en un escenario donde hay pocos molinetes. Se realizarán 5 ejecuciones para cada valor de  $h_d$  tomado, cada ejecución con un máximo de 15000 iteraciones. Esto se repetirá

para ambos métodos de decisión: por disponibilidad y por cercanía.

**Inputs:**

- $h_d \in \{ 0.1 \cdot L, 0.3 \cdot L, 0.5 \cdot L, 0.7 \cdot L, 0.9 \cdot L \}$
- Método de decisión  $\epsilon \{ \text{disponibilidad, cercanía} \}$

**Parámetros fijos:**

- $L = 50m$
- $t_t = 3s$
- $d = 1.2m$
- $k = 5$  [*unidades de molinetes*]
- $n = 150$  [*unidades de peatones*]
- $r_{min} = 0.2m$
- $r_{max} = 0.5m$
- $m = 70kg$

### 3.3.3. Cantidad de peatones y molinetes

Se tomaron diferentes valores para  $n$  y  $k$ , manteniendo el resto de los parámetros fijos. Se realizarán 5 ejecuciones para cada par  $(n, k)$  tomado, cada ejecución con un máximo de 15000 iteraciones.

Esto se repetirá para ambos métodos de decisión: por disponibilidad y por cercanía, y se tomará el mejor  $h_d$  para cada uno según los resultados del inciso anterior.

**Inputs:**

- $n \in \{ 100, 150, 200, 250, 300 \}$
- $k \in \{ 5, 30 \}$
- Método de decisión  $\epsilon \{ \text{disponibilidad, cercanía} \}$  con su  $h_d$  óptimo

**Parámetros fijos:**

- $L = 50m$
- $t_t = 3s$

- $d = 1.2m$
- $r_{min} = 0.2m$
- $r_{max} = 0.5m$
- $m = 70kg$

## 4. Resultados

### 4.1. Tiempo de transacción

#### 4.1.1. Decisión por cercanía

Comparando los resultados de dos simulaciones para los tiempos de transacción del molinete  $t_t = 2s$  y  $t_t = 10s$  a los 35s (iteración 12500):

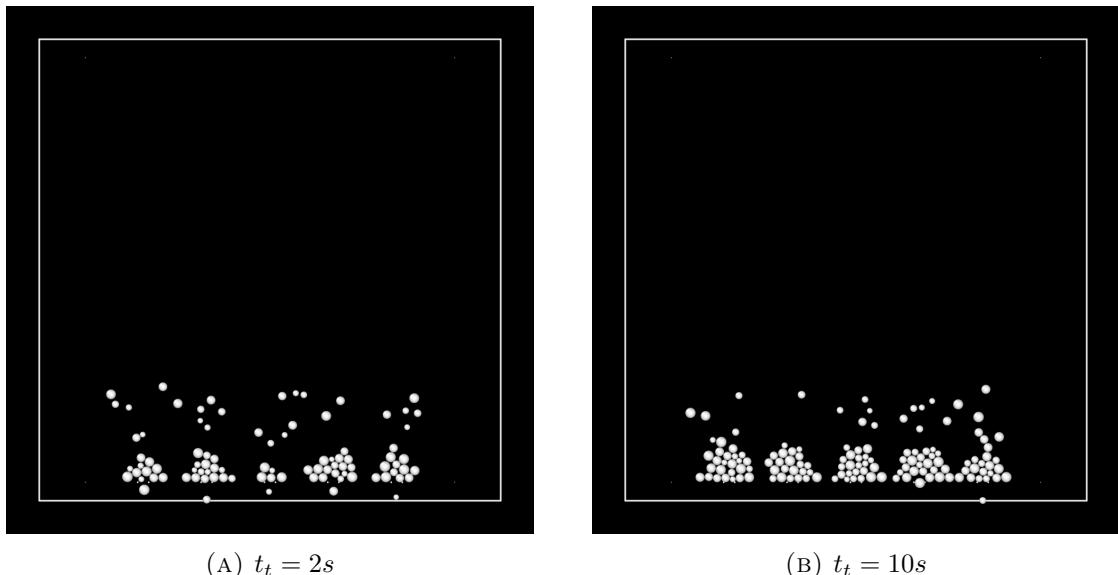


FIGURA 4.1: Estado a los 35s, elección por cercanía

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

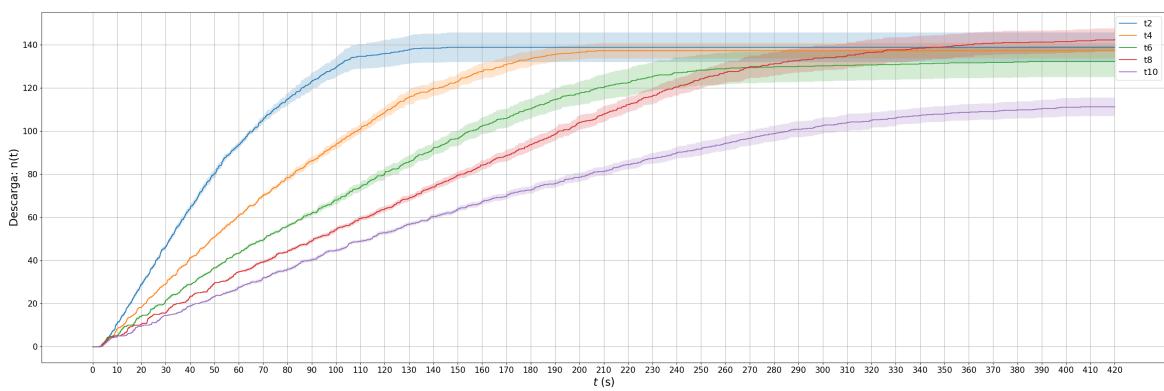


FIGURA 4.2: Descarga vs Tiempo, elección por cercanía

Caudal:

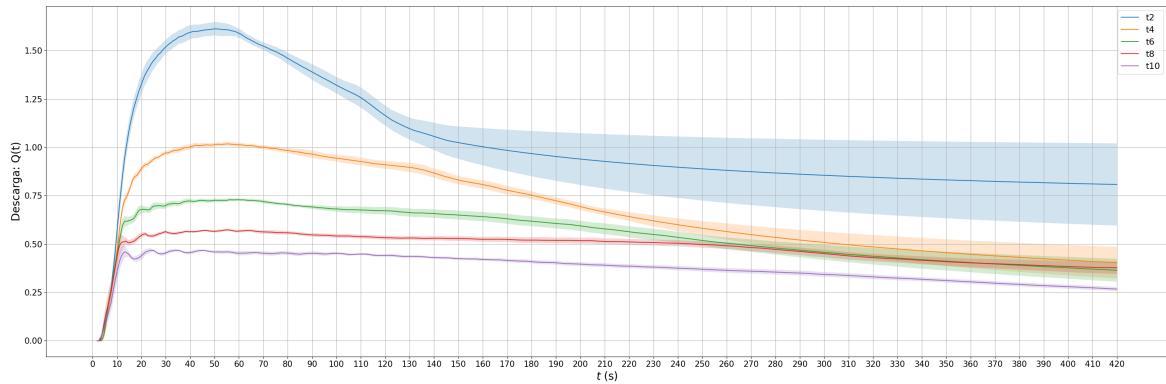


FIGURA 4.3: Caudal vs Tiempo, elección por cercanía

Densidad:

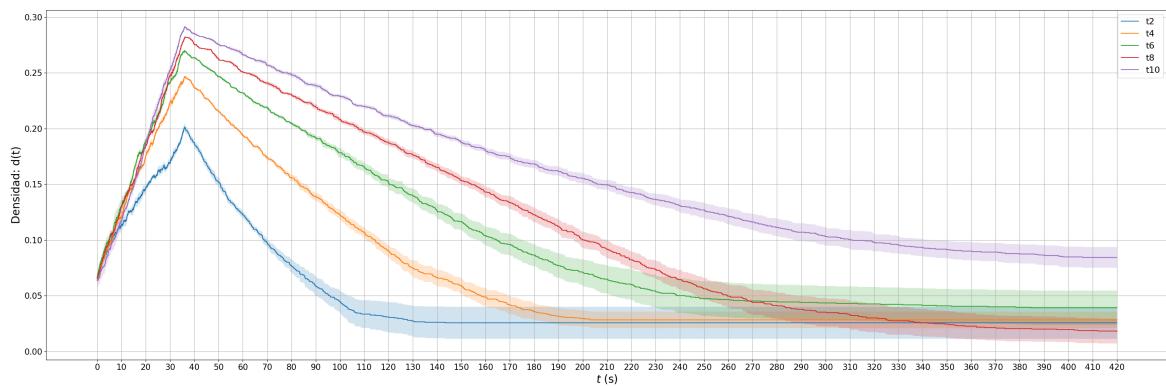


FIGURA 4.4: Densidad vs Tiempo, elección por cercanía

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

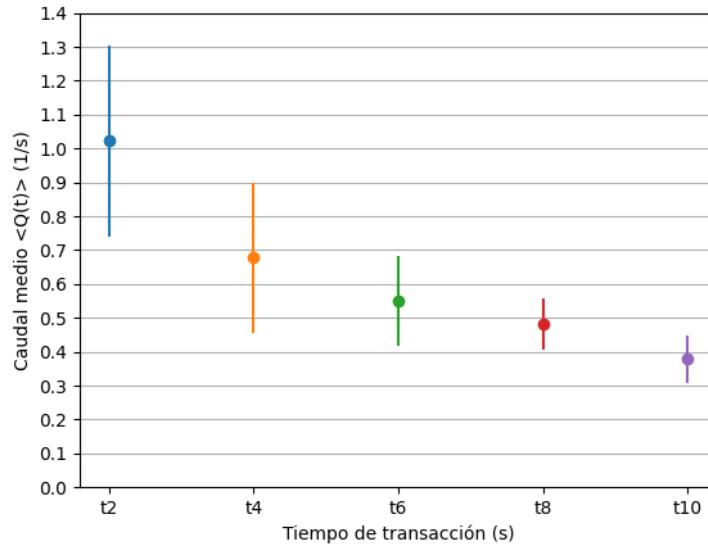


FIGURA 4.5: Input vs Caudal medio, elección por cercanía

Tiempo de escape:

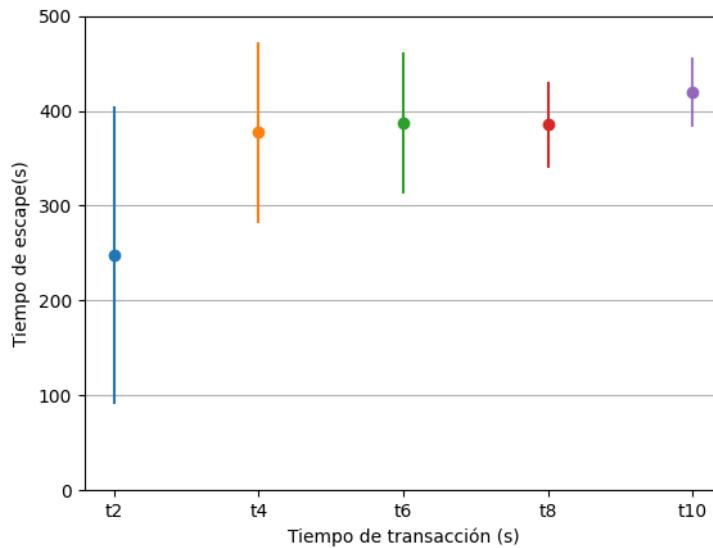


FIGURA 4.6: Input vs Tiempo de escape, elección por cercanía

#### 4.1.2. Decisión por disponibilidad

Comparando los resultados de dos simulaciones para los tiempos de transacción del molinete  $t_t = 2s$  y  $t_t = 10s$  a los 35s (iteración 12500):

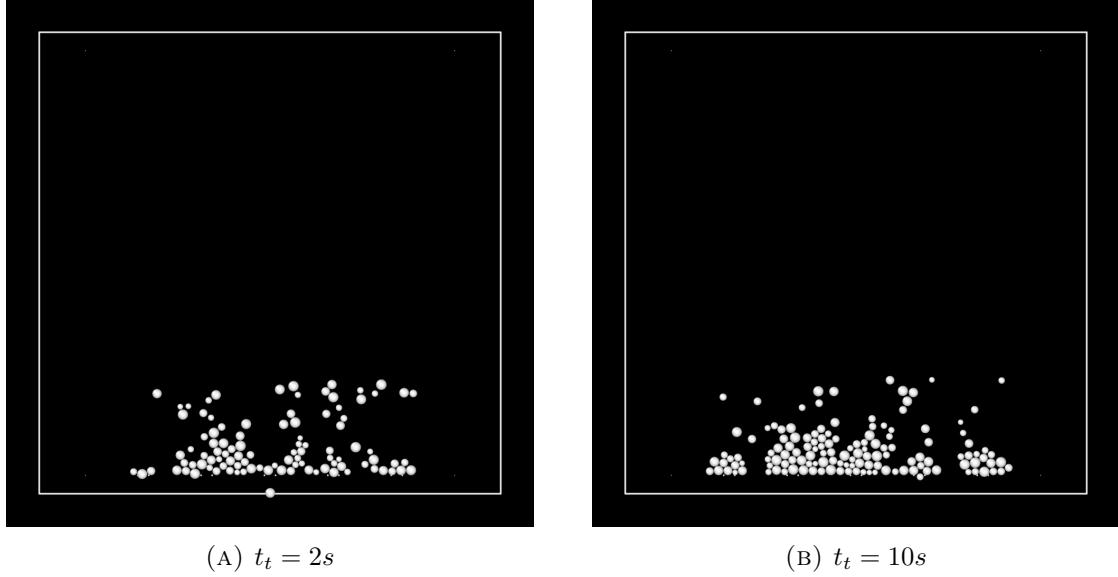


FIGURA 4.7: Estado a los 35s, elección por disponibilidad

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

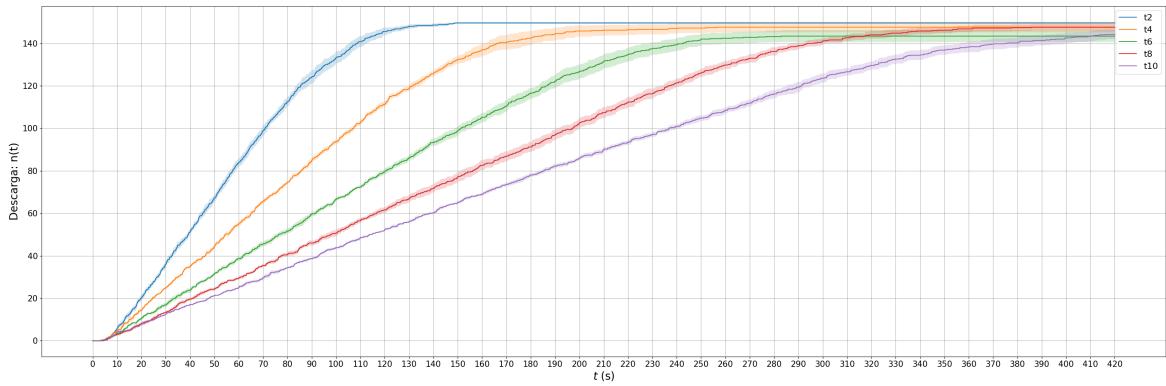


FIGURA 4.8: Descarga vs Tiempo, elección por disponibilidad

A primera vista se observa un comportamiento similar al caso de decisión por cercanía, sin embargo hay mucha menos variabilidad en los valores, resultando en un desvío más pequeño.

Caudal:

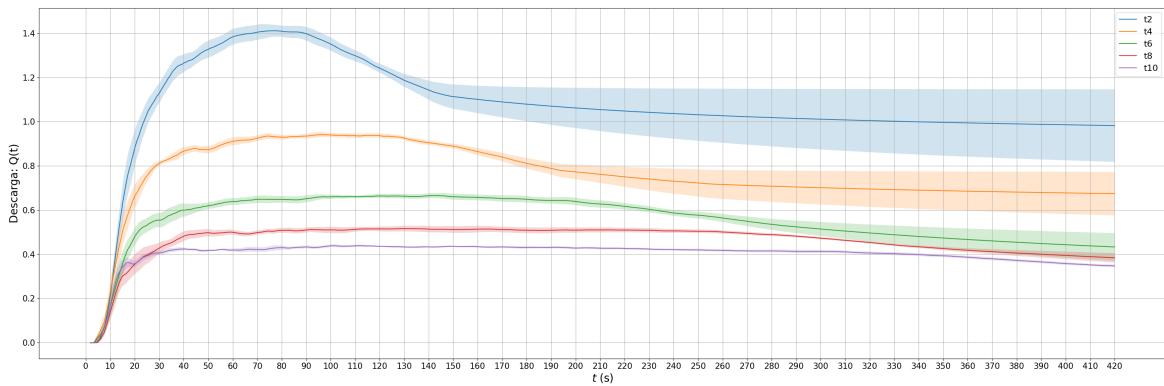


FIGURA 4.9: Caudal vs Tiempo, elección por disponibilidad

Densidad:

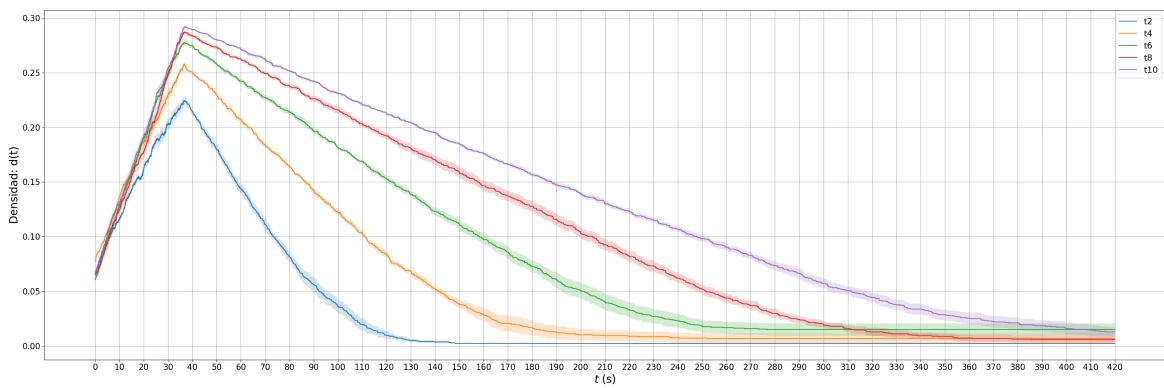


FIGURA 4.10: Densidad vs Tiempo, elección por disponibilidad

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

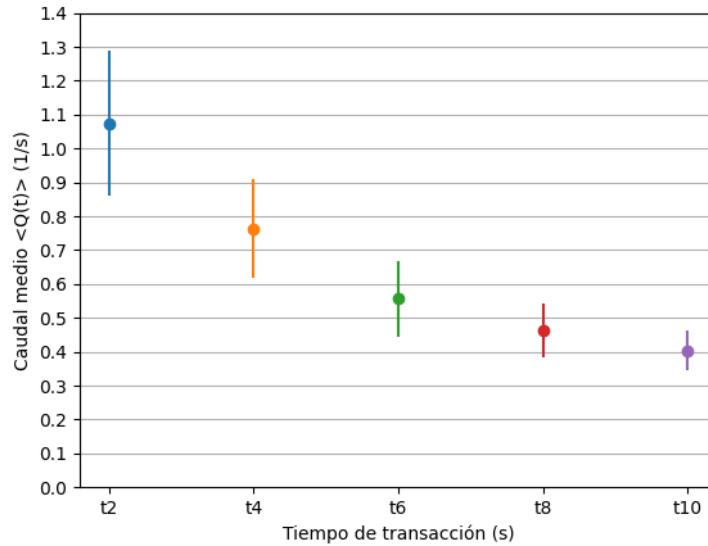


FIGURA 4.11: Input vs Caudal medio, elección por disponibilidad

Tiempo de escape:

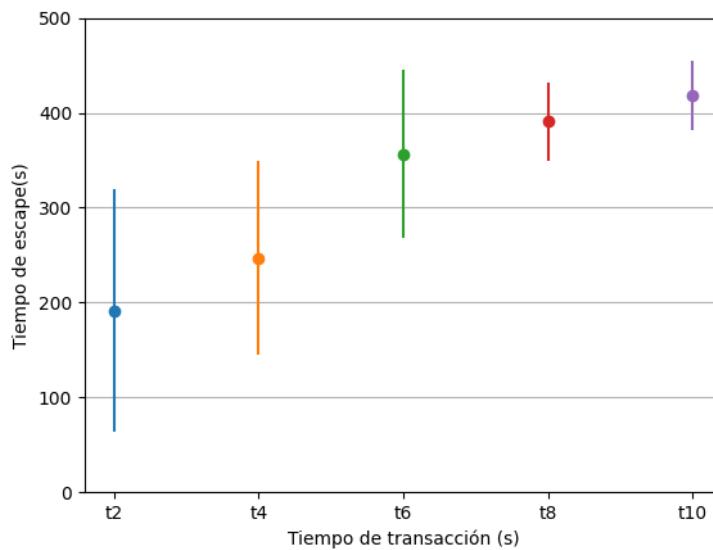


FIGURA 4.12: Input vs Tiempo de escape, elección por disponibilidad

## 4.2. Altura de decisión

### 4.2.1. Decisión por cercanía

Comparando los resultados de dos simulaciones con alturas de decisión  $h_d = 0.1 \cdot L$  y  $h_d = 0.9 \cdot L$  a los 35s (iteración 12500):

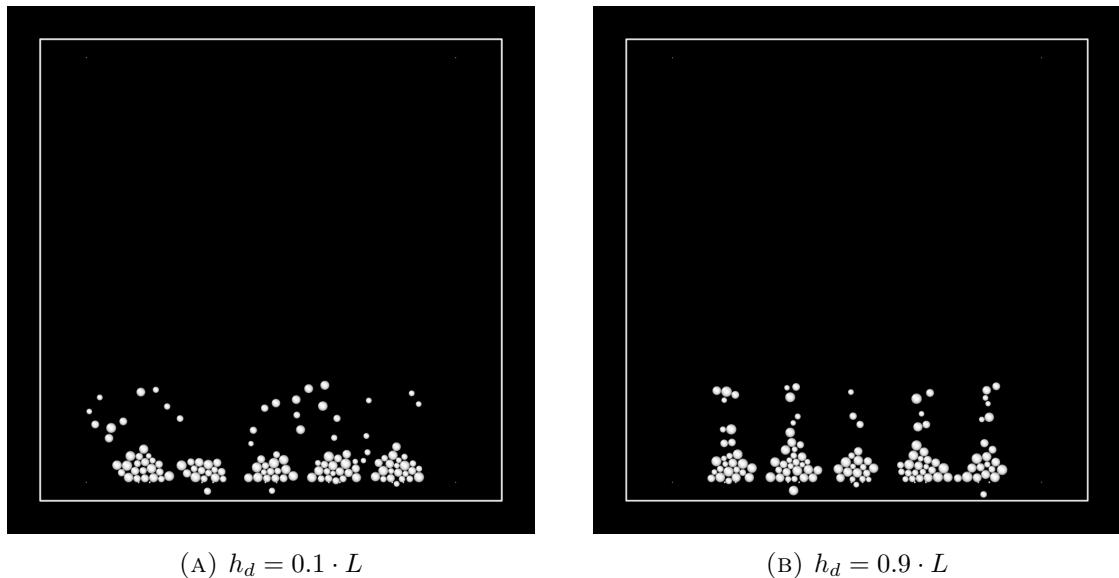


FIGURA 4.13: Estado a los 35s, elección por cercanía

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

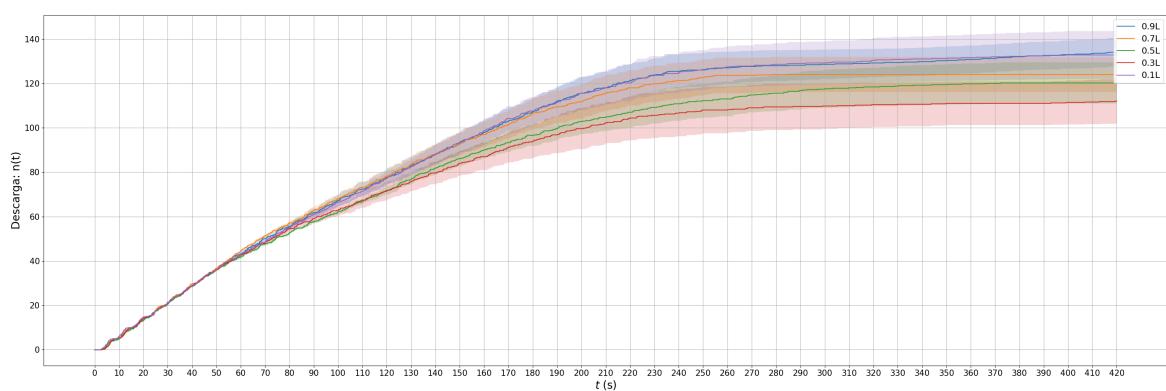


FIGURA 4.14: Descarga vs Tiempo, elección por cercanía

Caudal:

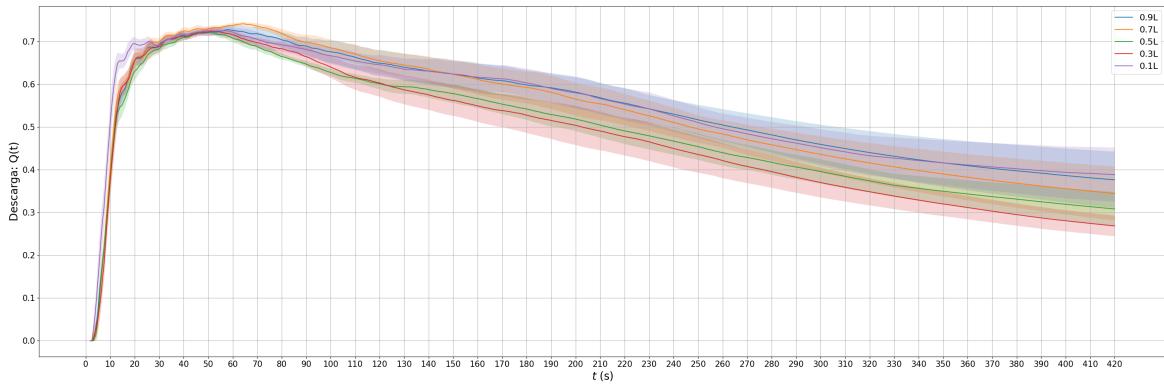


FIGURA 4.15: Caudal vs Tiempo, elección por cercanía

Densidad:

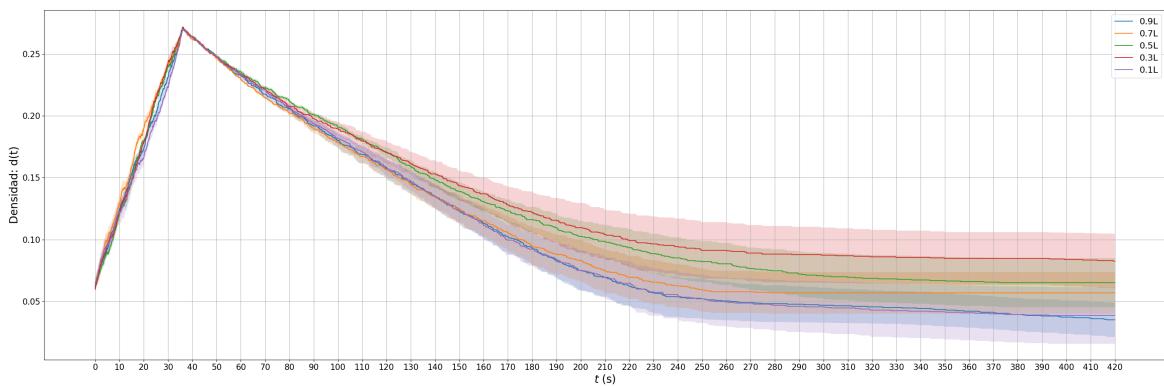


FIGURA 4.16: Densidad vs Tiempo, elección por cercanía

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

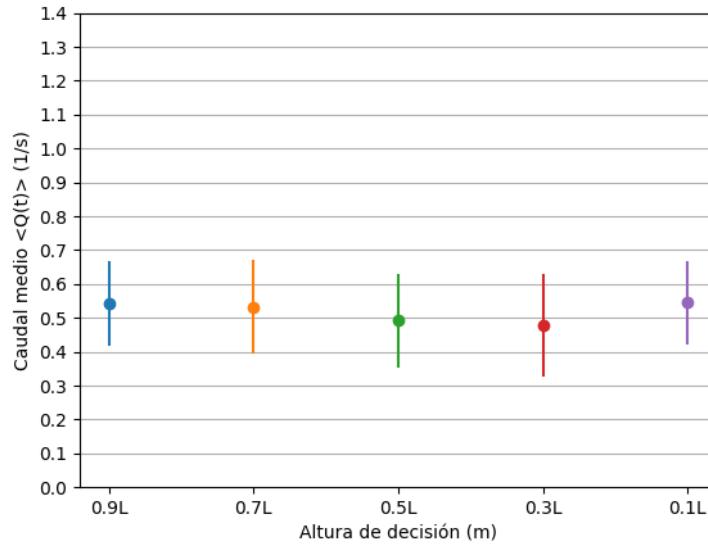


FIGURA 4.17: Input vs Caudal medio, elección por cercanía

Tiempo de escape:

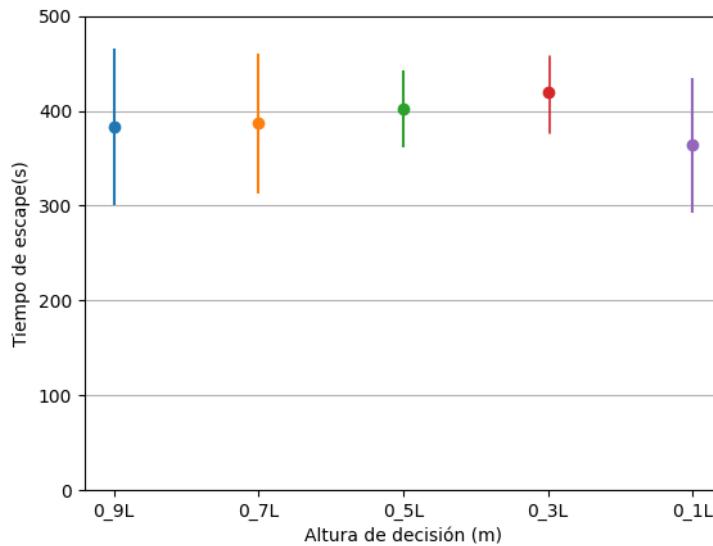


FIGURA 4.18: Input vs Tiempo de escape, elección por cercanía

#### 4.2.2. Decisión por disponibilidad

Comparando los resultados de dos simulaciones con alturas de decisión  $h_d = 0.1 \cdot L$  y  $h_d = 0.9 \cdot L$  a los 35s (iteración 12500):

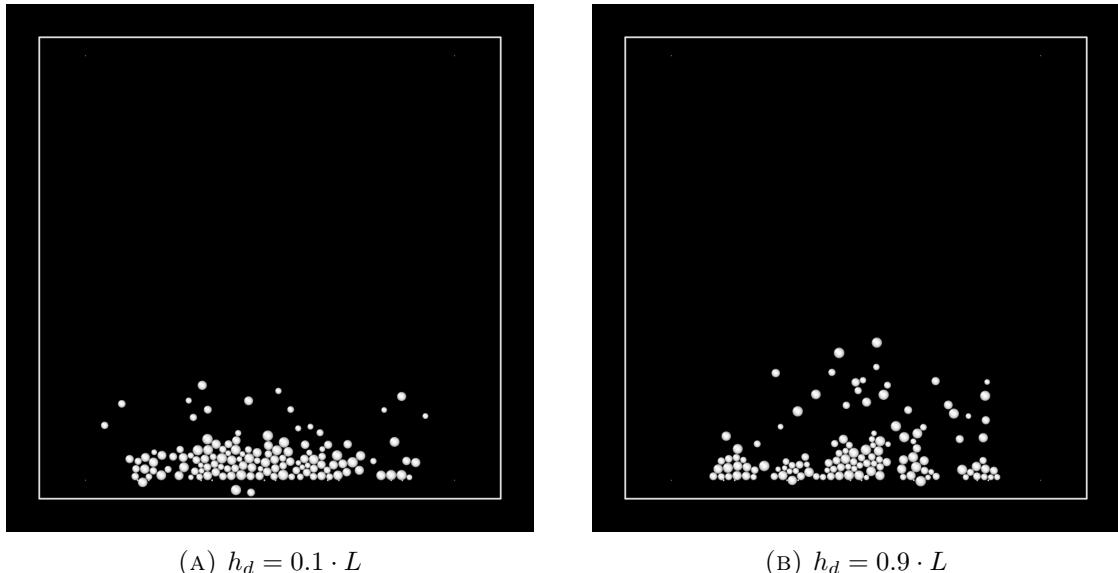


FIGURA 4.19: Estado a los 35s, elección por disponibilidad

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

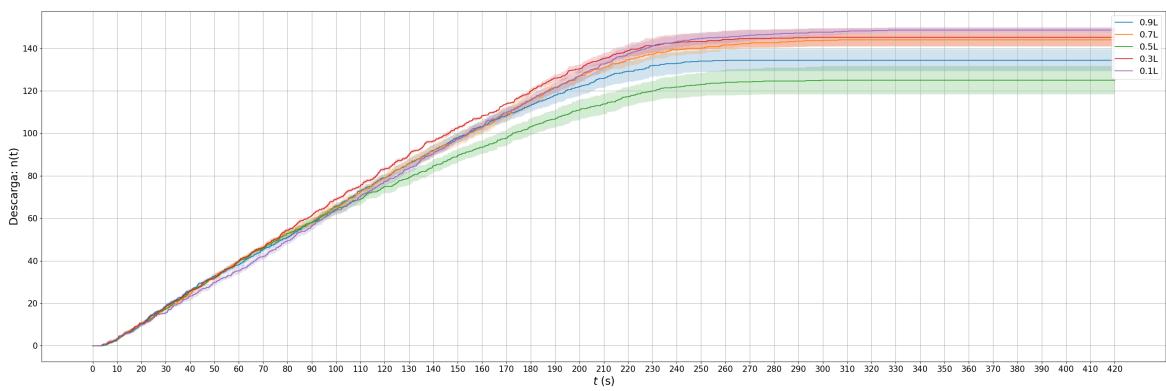


FIGURA 4.20: Descarga vs Tiempo, elección por disponibilidad

Caudal:

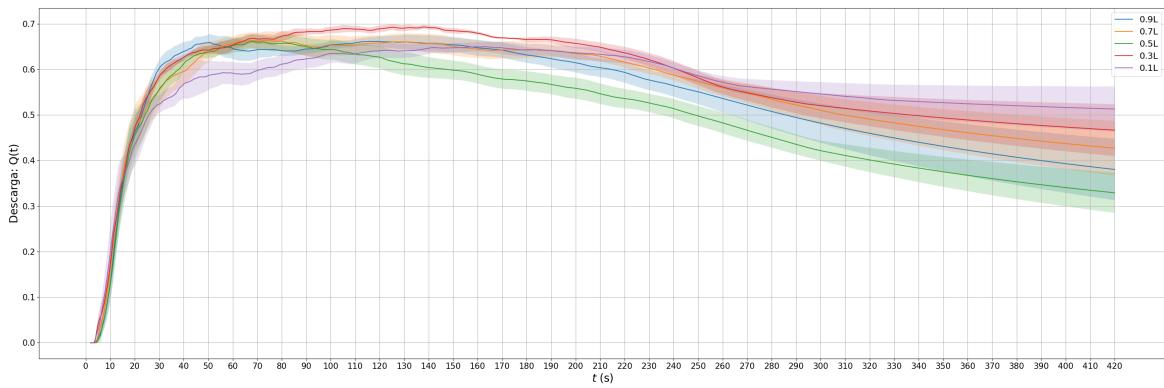


FIGURA 4.21: Caudal vs Tiempo, elección por disponibilidad

Densidad:

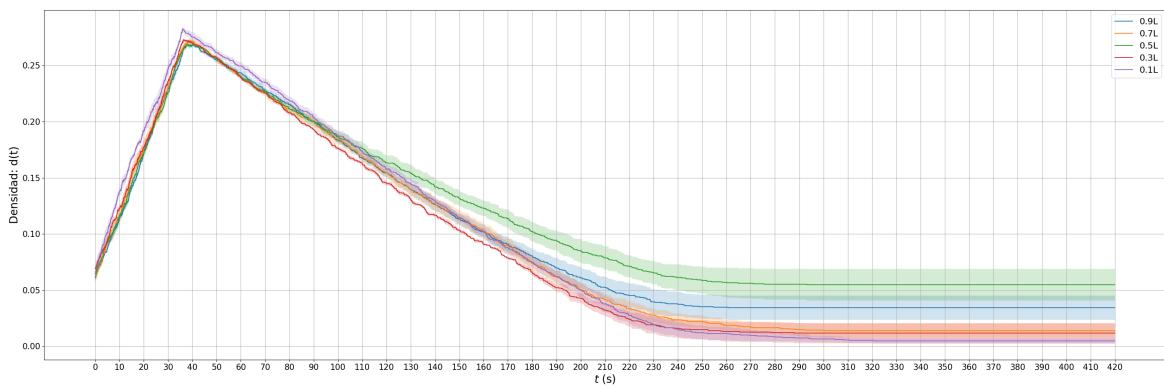


FIGURA 4.22: Densidad vs Tiempo, elección por disponibilidad

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

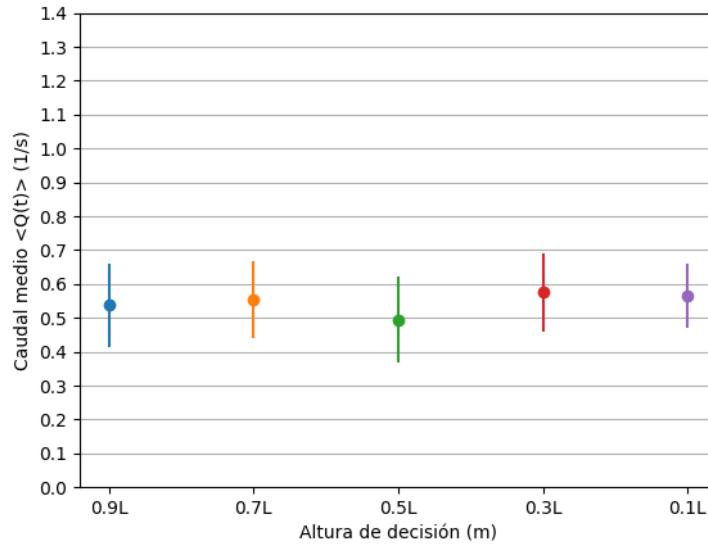


FIGURA 4.23: Input vs Caudal medio, elección por disponibilidad

Tiempo de escape:

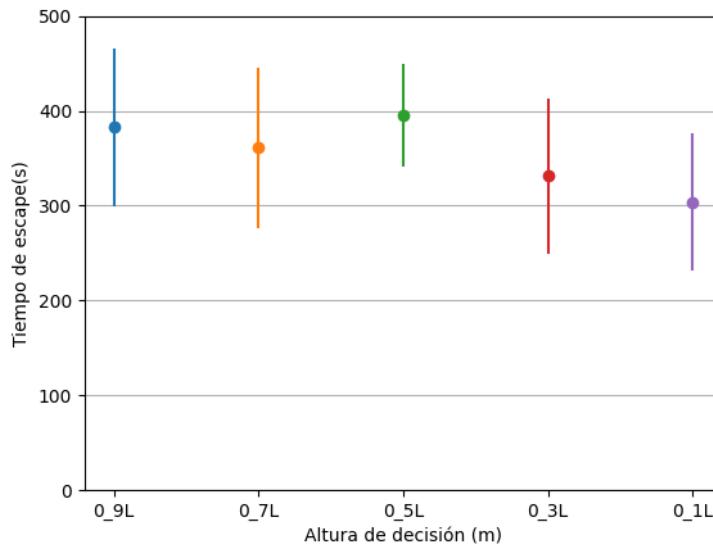


FIGURA 4.24: Input vs Tiempo de escape, elección por disponibilidad

### 4.3. Cantidad de peatones y molinetes

#### 4.3.1. Decisión por cercanía

##### 4.3.1.1. Pocos molinetes ( $k = 5$ )

Comparando los resultados de dos simulaciones con distinta cantidad de peatones  $n = 100$  y  $n = 300$  a los  $35s$  (iteración 12500), y tomando  $h_d = 0.1 \cdot L$ :

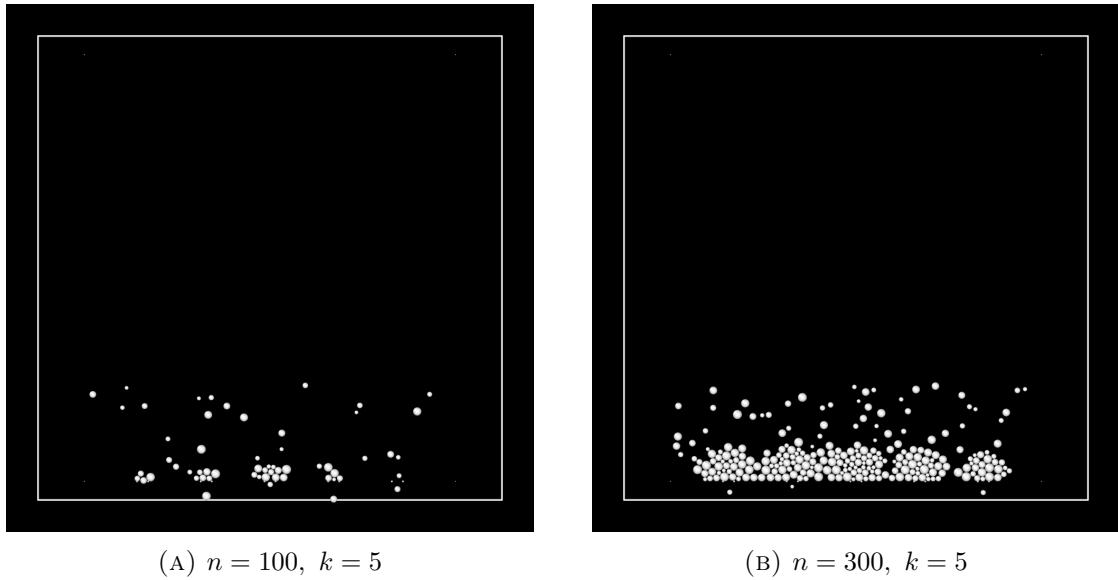


FIGURA 4.25: Estado a los 35s, elección por cercanía y  $k=5$

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

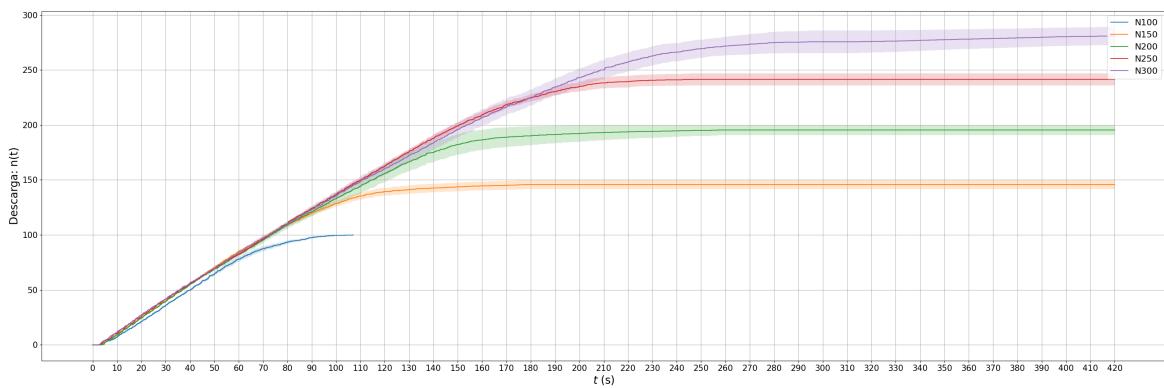


FIGURA 4.26: Descarga vs Tiempo, elección por cercanía y  $k=5$

Caudal:

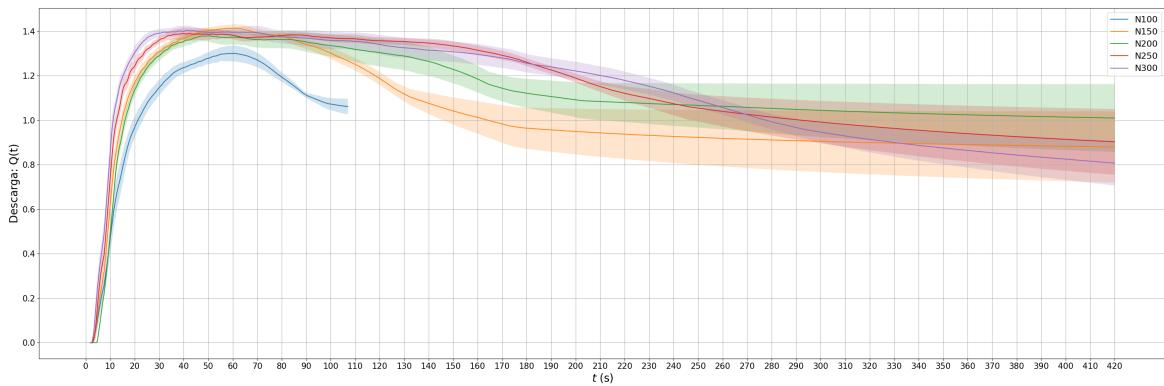


FIGURA 4.27: Caudal vs Tiempo, elección por cercanía y k=5

Densidad:

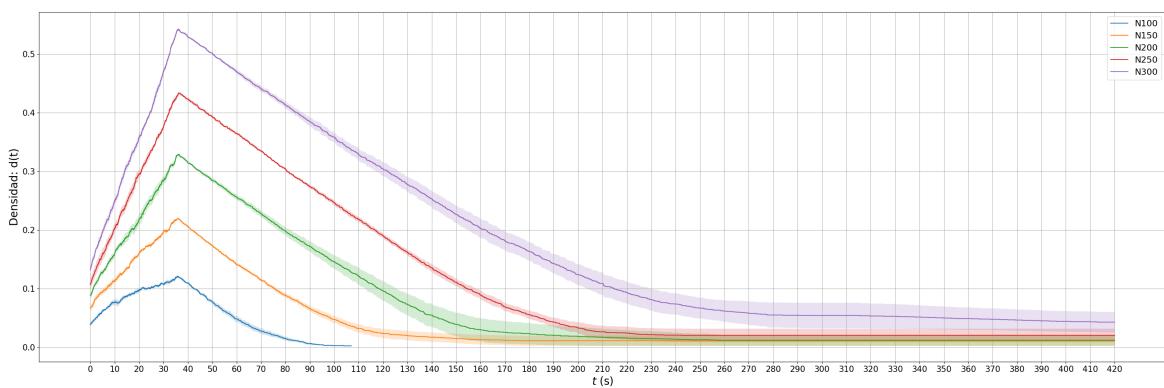


FIGURA 4.28: Densidad vs Tiempo, elección por cercanía y k=5

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

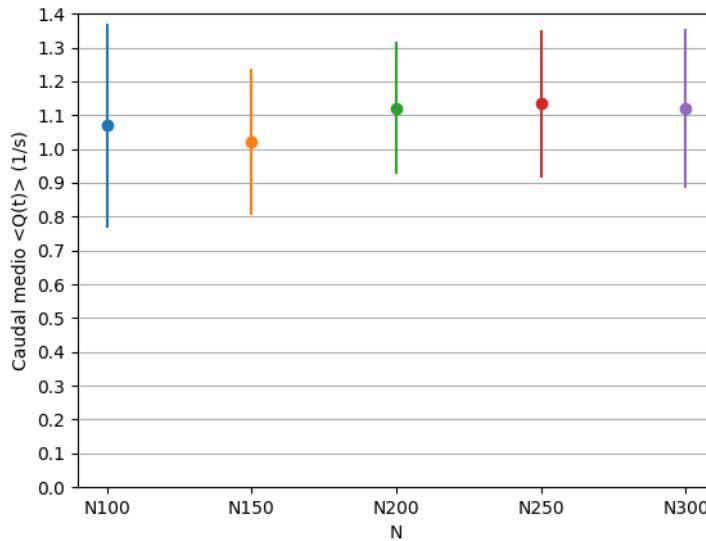


FIGURA 4.29: Input vs Caudal medio, elección por cercanía y k=5

Tiempo de escape:

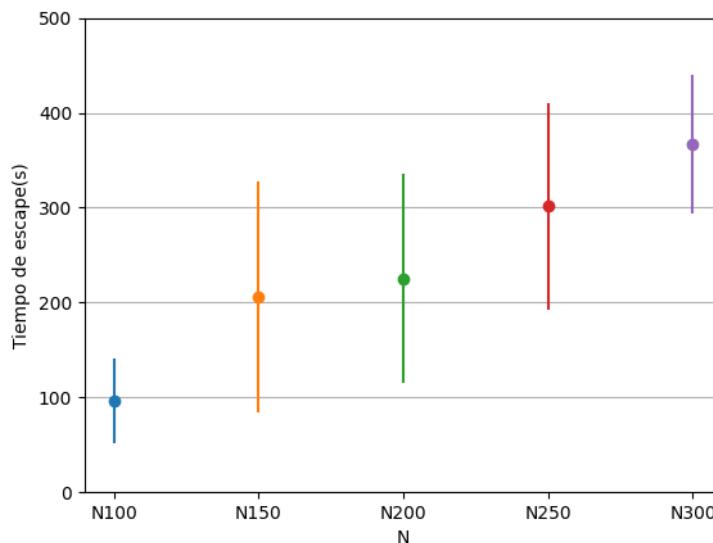


FIGURA 4.30: Input vs Tiempo de escape, elección por cercanía y k=5

#### 4.3.1.2. Muchos molinetes ( $k = 30$ )

Comparando los resultados de dos simulaciones con distinta cantidad de peatones  $n = 100$  y  $n = 300$  a los  $35s$  (iteración 12500), y tomando  $h_d = 0.1 \cdot L$ :

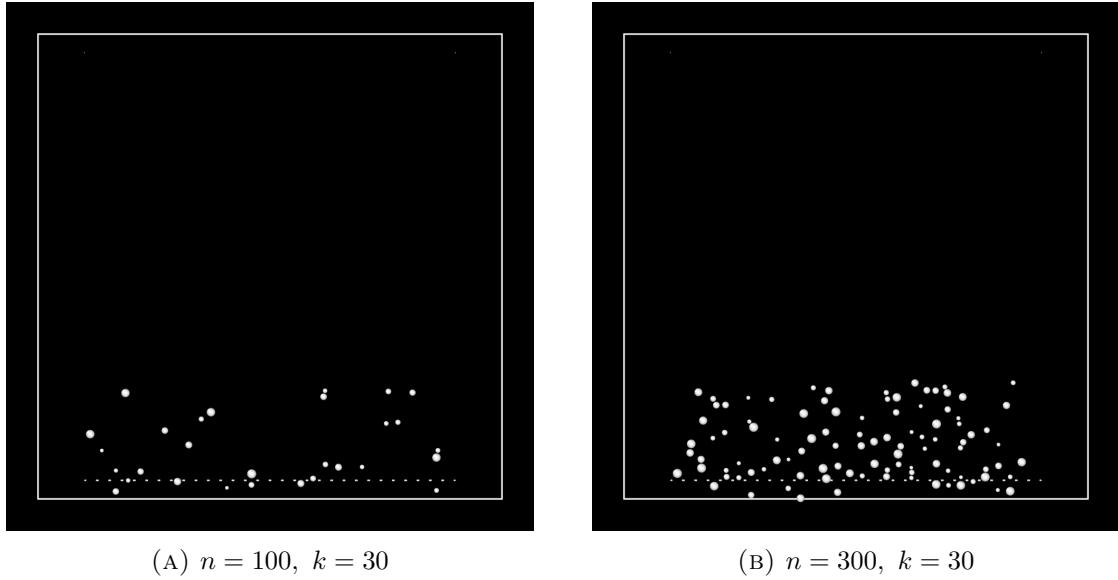


FIGURA 4.31: Estado a los 35s, elección por cercanía y  $k=30$

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

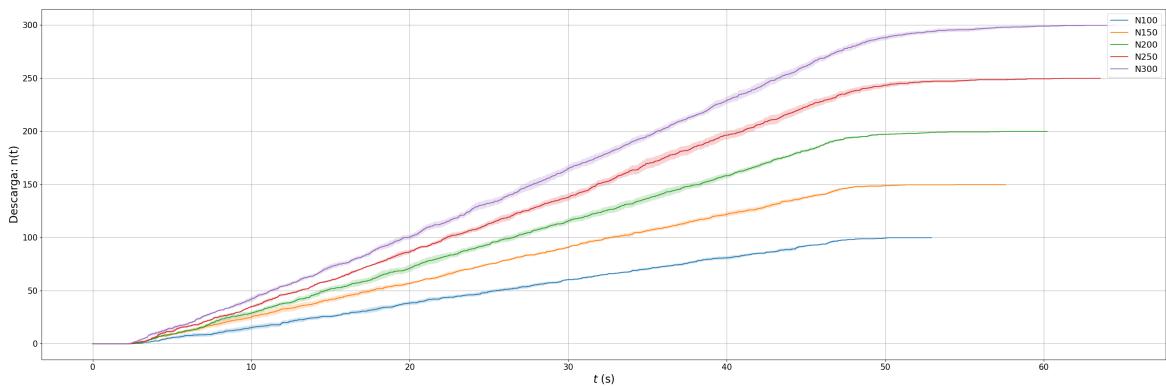


FIGURA 4.32: Descarga vs Tiempo, elección por cercanía y  $k=30$

Caudal:

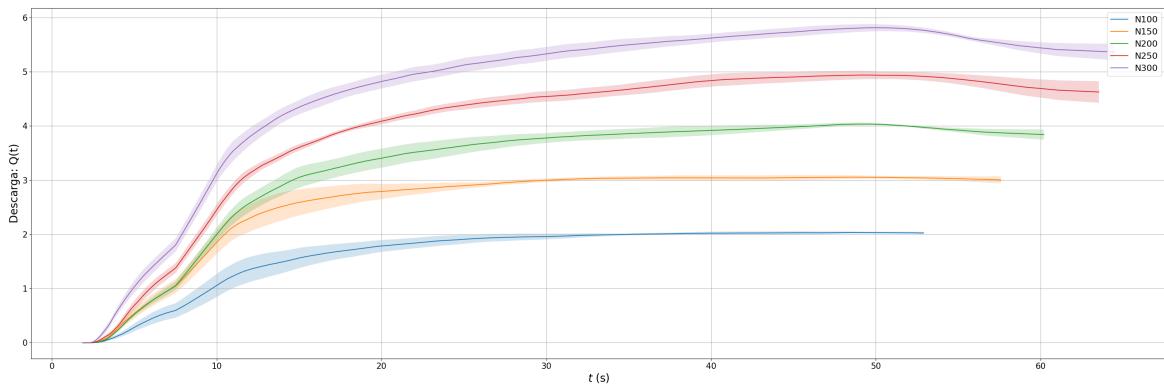


FIGURA 4.33: Caudal vs Tiempo, elección por cercanía y k=30

Densidad:

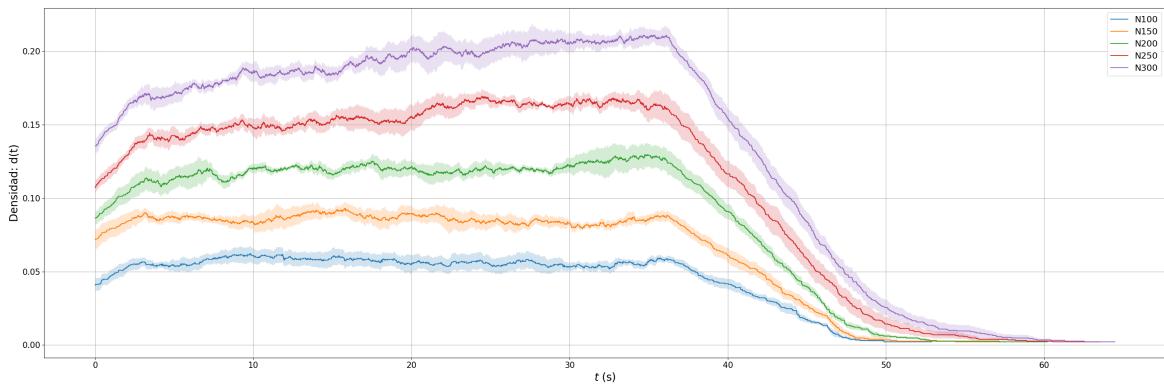


FIGURA 4.34: Densidad vs Tiempo, elección por cercanía y k=30

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

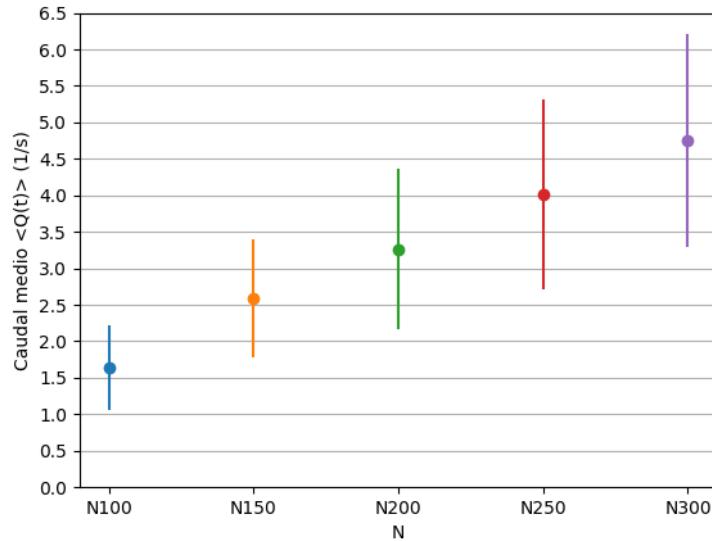


FIGURA 4.35: Input vs Caudal medio, elección por cercanía y k=30

Tiempo de escape:

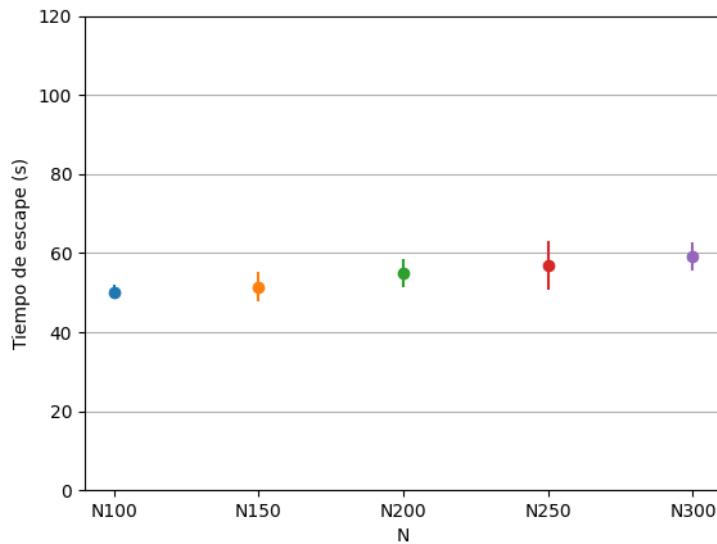


FIGURA 4.36: Input vs Tiempo de escape, elección por cercanía y k=30

### 4.3.2. Decisión por disponibilidad

#### 4.3.2.1. Pocos molinetes ( $k = 5$ )

Comparando los resultados de dos simulaciones con distinta cantidad de peatones  $n = 100$  y  $n = 300$  a los 35s (iteración 12500), y tomando  $h_d = 0.3 \cdot L$ :

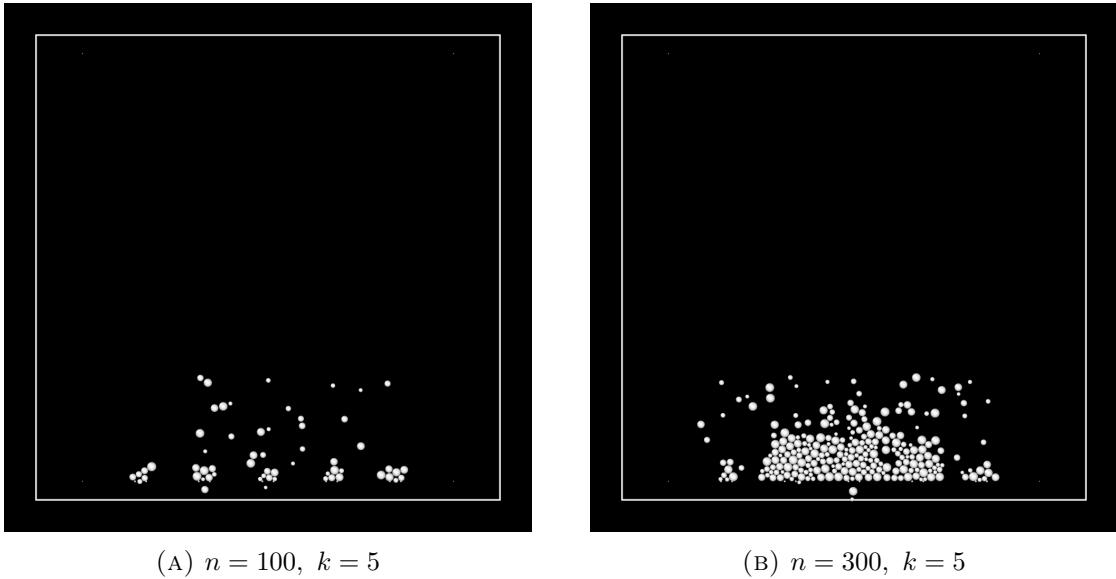


FIGURA 4.37: Estado a los 35s, elección por disponibilidad y  $k=5$

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

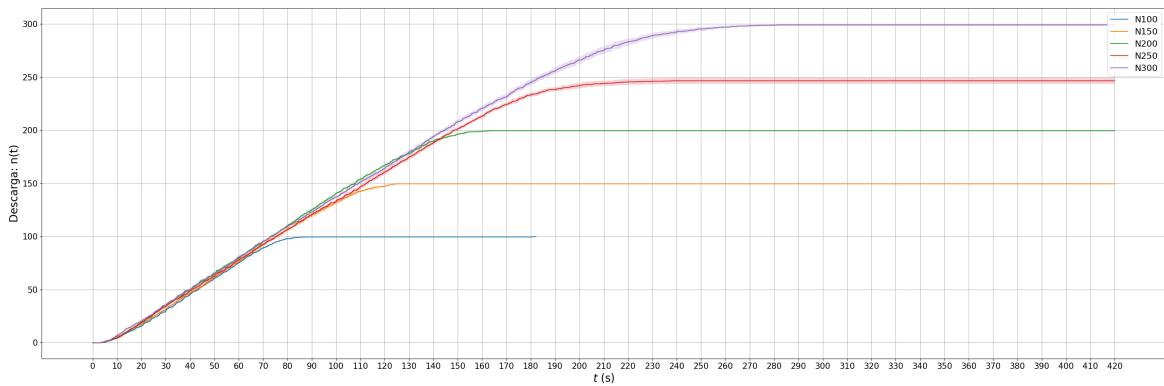


FIGURA 4.38: Descarga vs Tiempo, elección por disponibilidad y  $k=5$

Caudal:

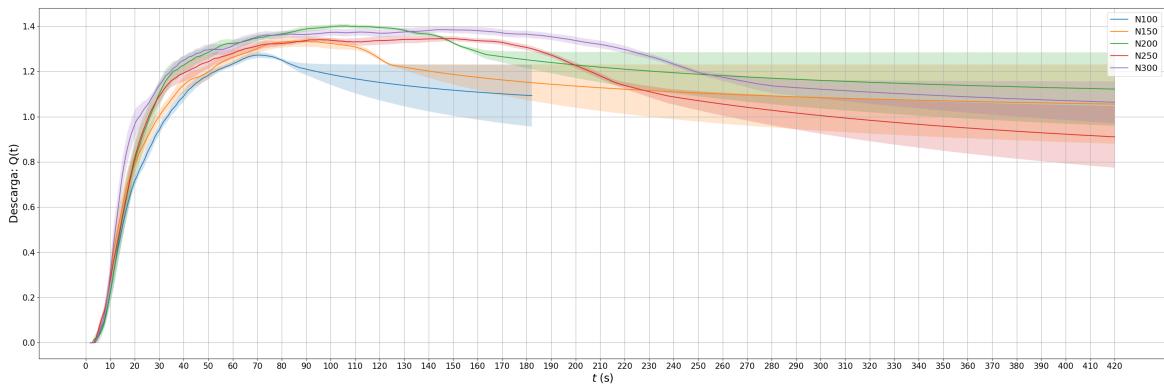


FIGURA 4.39: Caudal vs Tiempo, elección por disponibilidad y  $k=5$

Densidad:

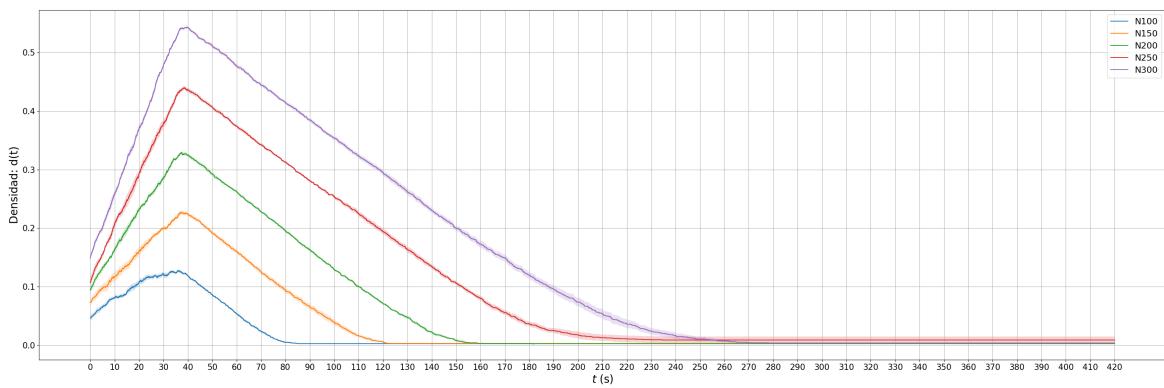


FIGURA 4.40: Densidad vs Tiempo, elección por disponibilidad y  $k=5$

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

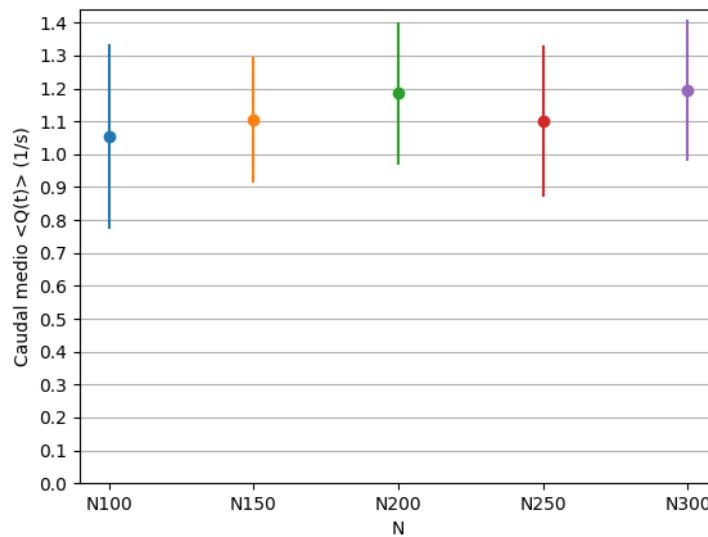


FIGURA 4.41: Input vs Caudal medio, elección por disponibilidad y k=5

Tiempo de escape:

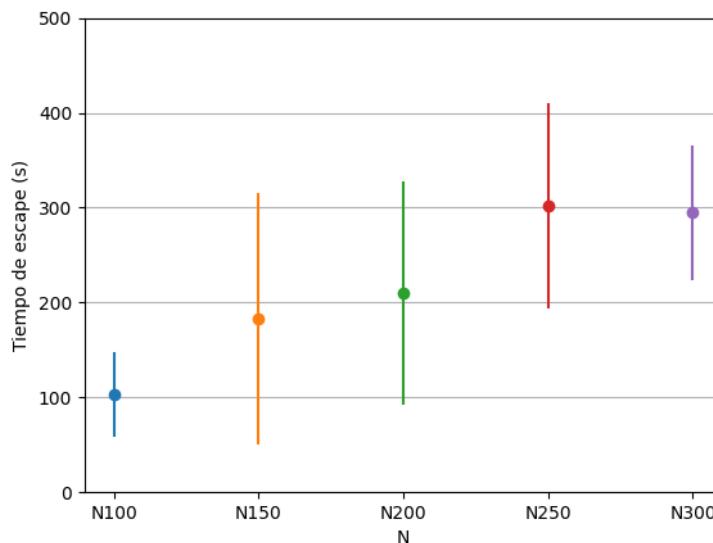


FIGURA 4.42: Input vs Tiempo de escape, elección por disponibilidad y k=5

#### 4.3.2.2. Muchos molinetes ( $k = 30$ )

Comparando los resultados de dos simulaciones con distinta cantidad de peatones  $n = 100$  y  $n = 300$  a los  $35s$  (iteración 12500), y tomando  $h_d = 0.3 \cdot L$ :

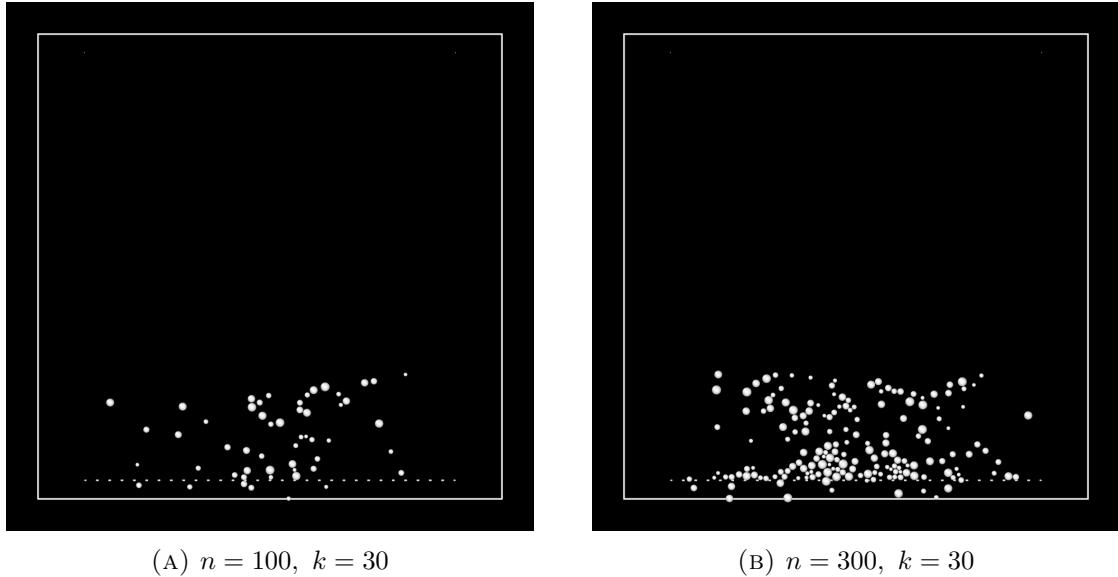


FIGURA 4.43: Estado a los  $35s$ , elección por disponibilidad y  $k=30$

A continuación se muestra la evolución de los observables en el tiempo:

Curva de descarga:

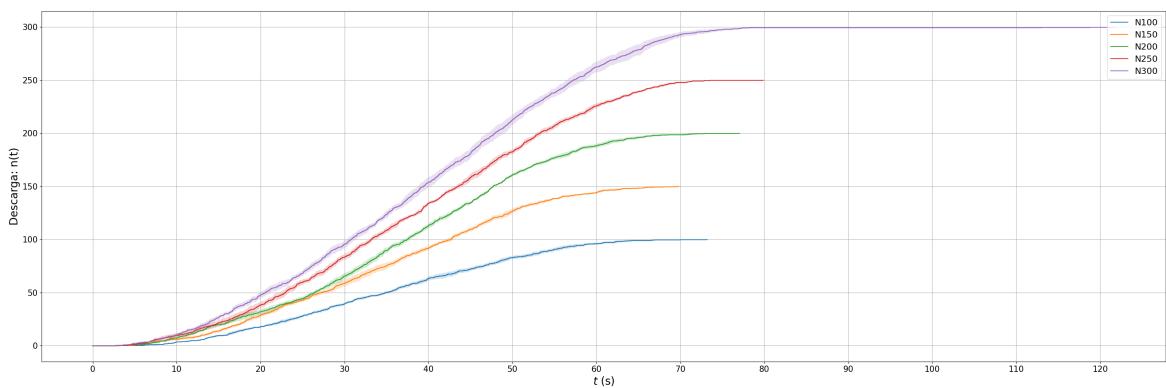


FIGURA 4.44: Descarga vs Tiempo, elección por disponibilidad y  $k=30$

Caudal:

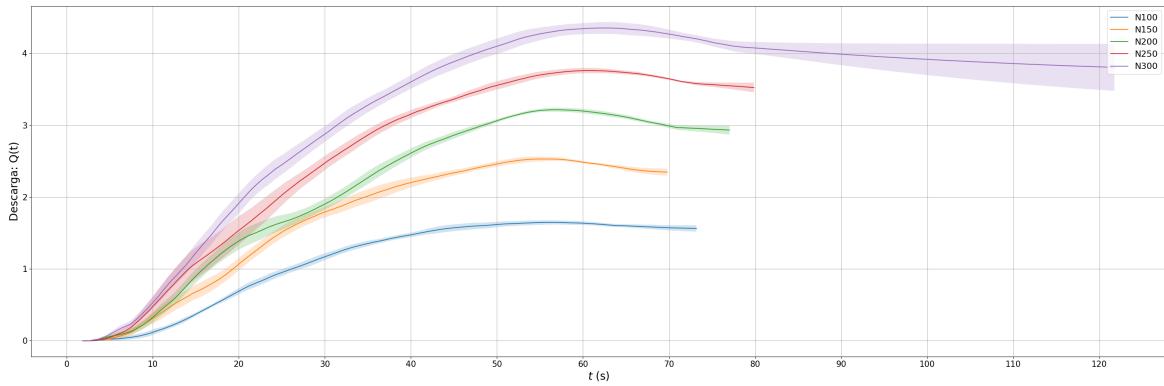


FIGURA 4.45: Caudal vs Tiempo, elección por disponibilidad y  $k=30$

Densidad:

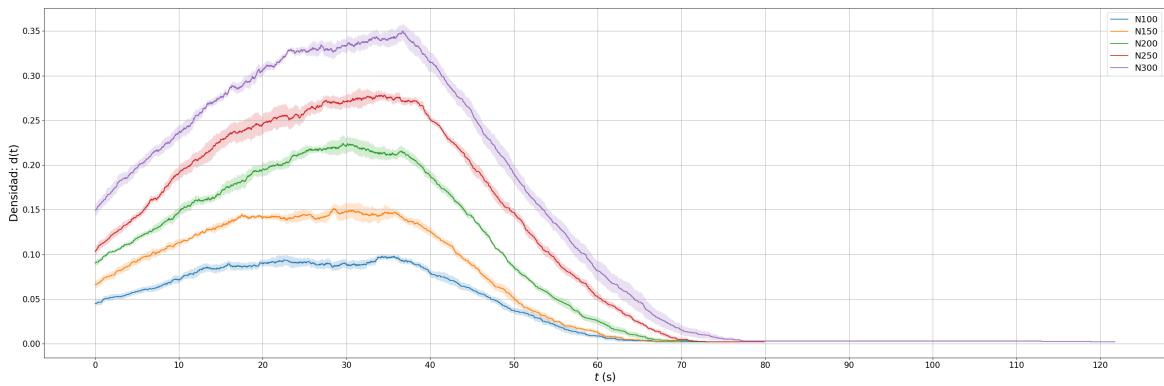


FIGURA 4.46: Densidad vs Tiempo, elección por disponibilidad y  $k=30$

Por último, observamos las métricas vs los inputs:

Caudal medio:

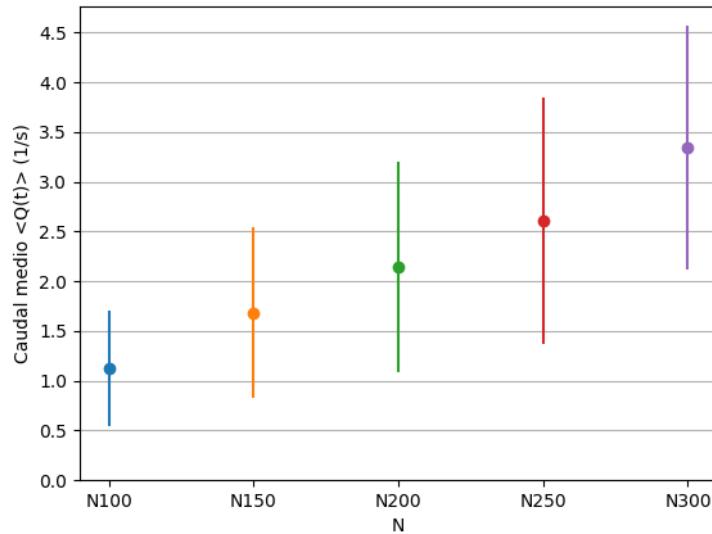


FIGURA 4.47: Input vs Caudal medio, elección por disponibilidad y  $k=30$

Tiempo de escape:

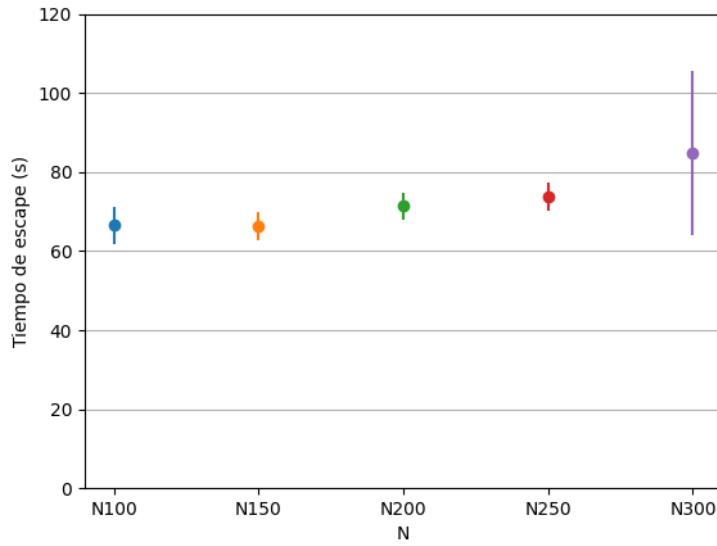


FIGURA 4.48: Input vs Tiempo de escape, elección por disponibilidad y  $k=30$

## 5. Conclusiones

### 5.1. Tiempo de transacción

- A menor tiempo de transacción, resulta mayor el caudal medio.
- La variabilidad del caudal medio disminuye cuanto mayor es el tiempo de transacción.
- No se observan grandes diferencias entre los valores de caudal medio alcanzados tanto al utilizar el método de decisión por cercanía como el de disponibilidad.
- Si bien se mantiene una relación proporcional entre el tiempo de transacción y el tiempo de escape, para la decisión por disponibilidad podría hacerse un ajuste lineal mientras que para la decisión por cercanía esto no sucede.
- Para la decisión por cercanía, que el tiempo de transacción esté entre 4, 6 u 8 segundos afecta de forma casi equivalente al tiempo total de salida.

### 5.2. Altura de decisión

- La altura en la que se elige el molinete target no afecta mucho el caudal medio de salida, sin importar el método de decisión tomado.
- El caudal medio es menor a mitad de camino, implicando un tiempo total de salida mayor.
- Si el peatón está lejos cuando toma la decisión, su recorrido resultará más directo, no afectando tanto al tiempo de salida.
- Si se toma la decisión más cerca, esto resulta notablemente favorable en el caso de decisión por disponibilidad, con una mejoría de alrededor de 100 segundos contra el caso más desfavorable.

### 5.3. Cantidad de peatones y molinetes

- Al tener pocos molinetes y aumentar la cantidad de individuos, el caudal medio no varía mucho y el tiempo de salida aumenta proporcionalmente. Al contrario, cuando hay muchos molinetes, el caudal medio de escape aumenta pero los tiempos de salida se mantienen prácticamente iguales al tener más vías de escape.

- Cambiar el método de decisión no afecta mucho cuando hay pocos molinetes.
- El método de decisión por cercanía da mejores resultados cuando hay mayor cantidad de molinetes, obteniendo valores entre 40s y 60s para el tiempo de escape.
- El método de decisión por disponibilidad cuando se cuenta con 300 peatones es el que peor resultados da: tarda cerca de los 90s y tiene una variabilidad muy alta. Esto se debe a que, al haber tantos individuos, la disponibilidad entre molinetes es muy parecida.

## Referencias

- [1] Dirk Helbing, Illés Farkas y Tamas Vicsek. “Simulating dynamical features of escape panic”. En: *Nature* 407.6803 (2000), págs. 487-490. DOI: [10.1038/35035023](https://doi.org/10.1038/35035023).