



**ventilatiolab**



**ESTUDIO DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) PARA LA  
DETECCIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS URBANOS QUE AFECTEN AL ARBOLADO  
VIARIO EN CONDICIONES METEOROLÓGICAS EXTREMAS.**

*Cliente: Ayuntamiento de Madrid*

*Presentado por: Ventilatio Lab S.L*

*Diciembre 2025*

## Índice de contenidos

1. Introducción y objetivos.....	4
2. Metodología .....	6
2.1. Datos meteorológicos.....	7
2.2. Reconstrucción CFD de un dominio urbano.....	8
2.2.1. Tratamiento de datos LiDAR y catastrales .....	10
2.2.2. Capa límite atmosférica y modelización de la vegetación .....	13
3. Resultados.....	17
3.1. Condiciones meteorológicas más representativas.....	18
3.2. Condiciones meteorológicas adversas .....	23
3.2.1. Borrasca Elsa.....	24
3.2.2. Borrasca Herminia .....	27
3.2.3. DANA de Valencia.....	29
3.3. Resultados de las simulaciones .....	31
3.3.1. Caso 1: $v = 2,8$ m/s (NE).....	32
3.3.2. Caso 2: $v = 3,5$ m/s (SO).....	34
3.3.3. Borrasca Elsa.....	36
3.3.4. Borrasca Herminia .....	38
3.3.5. DANA .....	40
4. Discusión de los resultados .....	42
4.1. Zonas de estudio.....	42
4.2. Barrio de las Águilas .....	43
4.2.1. Viento noreste (NE) .....	44
4.2.2. Viento suroeste (SO).....	48

4.3.	Barrio de Aluche .....	52
4.3.1.	Viento noreste (NE) .....	52
4.3.2.	Viento suroeste (SO).....	56
4.4.	Barrios de Carabanchel.....	60
4.4.1.	Viento noreste (NE) .....	61
4.4.2.	Viento suroeste (SO).....	64
4.5.	Barrio de La Latina .....	68
4.5.1.	Viento noreste (NE) .....	69
4.5.2.	Viento suroeste (SO).....	72
4.6.	Barrio de Comillas.....	76
4.6.1.	Viento noreste (NE) .....	77
4.6.2.	Viento suroeste (SO).....	80
5.	Conclusiones.....	83
6.	Nota.....	86
7.	Bibliografía .....	87

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El arbolado viario de Madrid constituye un elemento esencial dentro de la infraestructura verde urbana, no solo por su valor estético y cultural, sino por los múltiples beneficios ambientales y sociales que aporta. Los árboles situados en las calles contribuyen a la regulación térmica, la mejora de la calidad del aire, la reducción del ruido y el fomento de la biodiversidad, siendo aliados fundamentales en la mitigación del cambio climático y la mejora del bienestar ciudadano.

No obstante, su presencia en entornos urbanos densos plantea importantes desafíos. Las condiciones adversas, como la escasez de espacio radicular, las altas temperaturas derivadas del efecto isla de calor, la contaminación y, especialmente, la exposición a fenómenos meteorológicos extremos, ponen en riesgo su estabilidad, salud y capacidad funcional. En particular, los vientos racheados y las turbulencias generadas por la morfología urbana (efecto túnel, vórtices, zonas de estancamiento) son factores críticos que pueden provocar daños en el arbolado e incrementar el riesgo de caída de ramas o ejemplares completos.

El *Plan Director del Arbolado Viario de la Ciudad de Madrid* destaca la necesidad de adoptar enfoques innovadores que garanticen una gestión más eficiente y resiliente de este patrimonio natural. En este marco, la presente propuesta plantea la utilización de técnicas avanzadas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para analizar el comportamiento del viento en el entorno urbano. El objetivo es identificar zonas críticas donde las condiciones aerodinámicas puedan comprometer la integridad del arbolado y, a partir de ello, desarrollar recomendaciones específicas para su protección y gestión.

La integración de modelos 3D de alta precisión y simulaciones CFD permitirá generar información de gran valor para la toma de decisiones estratégicas en el diseño y mantenimiento de la infraestructura verde. Este estudio se concibe como una herramienta clave para avanzar hacia una ciudad más verde, segura y sostenible, en consonancia con las directrices del Plan Director.

El estudio se centrará en una zona de unos 40 km<sup>2</sup> que abarca el distrito de Carabanchel (completo) y parte de los distritos de La Latina y Usera. La zona de estudio está delimitada por



**Figura 1:** Zona de alcance del estudio, que incluye el barrio de Carabanchel y parte de Latina y Usera (extraído de Google Earth).

la A-42, la M-30, la M-40 y la A-5. En la Figura 1 se muestra la zona de alcance del estudio, limitada por el alcance del proyecto. La elección de esta zona se basa en la densidad de arbolado viario, con un alto porcentaje de especies vulnerables al viento. Se trata de una zona con gran cantidad de parques y zonas al aire libre, que obstruyen muy levemente el avance del viento y pueden generar corrientes muy racheadas en las calles cercanas.

En el presente informe, nuestros principales objetivos son los siguientes:

- Analizar el comportamiento del viento en el entorno urbano mediante simulaciones CFD avanzadas, con especial atención a las áreas de influencia del arbolado viario.
- Realizar un análisis estacional de las condiciones de viento predominantes en cada época del año, partiendo de reanálisis meteorológicos de baja resolución (predicciones meteorológicas corregidas con mediciones).

- Comparar las condiciones de viento predominantes con condiciones más extremas, en las que exista presencia de borrascas y/o alertas por viento.
- Detectar puntos críticos de turbulencia, estancamiento o aceleración del flujo de aire que puedan afectar negativamente al desarrollo y estabilidad del arbolado, comparando los distintos casos simulados.
- Proporcionar recomendaciones técnicas específicas para mitigar los efectos adversos identificados y favorecer la sostenibilidad y seguridad del arbolado.
- Contribuir al diseño y gestión racional del arbolado viario, apoyando las estrategias de adaptación al cambio climático definidas en el Plan Director.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto se estructura en cuatro fases principales que combinan la recopilación rigurosa de datos, el modelado tridimensional preciso y el análisis avanzado de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), con el fin de ofrecer resultados fiables y útiles para la gestión del arbolado viario:

1. **Obtención de datos estadísticos de velocidad y dirección del viento**, extraídos a través del reanálisis de distintos modelos meteorológicos. Las observaciones de datos meteorológicos son tratadas a posteriori y los datos son interpolados en bloques de baja resolución (varios kilómetros), dando lugar a un mapa de vientos de baja resolución. El detalle más fino es introducido en las simulaciones CFD de nuestro modelo.
2. **Ejecución de la reconstrucción del dominio** de la Figura 1 a partir de dos conjuntos de datos públicos: información topográfica en formato nube de puntos (es decir, puntos LiDAR que contienen información de altura y tipo de terreno) y datos catastrales que delimitan la forma de cada edificio. Ambos conjuntos de datos son de libre acceso en el caso de España, que ha terminado de realizar recientemente una tercera cobertura de puntos en todo el territorio nacional. Muchos países de la Unión Europea están

empezando a tomar datos LiDAR de su terreno, por lo que esperamos poder aplicar esta metodología a cualquier sitio con acceso a este tipo de datos.

3. **Configuración y ejecución de cada una de las simulaciones planeadas.** Una vez extraídos datos históricos de dirección y velocidad de viento en la zona de Madrid, se plantea un análisis de las condiciones de viento predominantes en la ciudad, ejecutando las simulaciones que repliquen estas condiciones más representativas. Posteriormente, se plantea la ejecución de simulaciones en diferentes casos límite, en los que las condiciones de viento se corresponden con episodios de borrascas intensas, ciclogénesis explosivas u otros eventos meteorológicos con alertas por viento.
4. **Post-procesado y extracción de información** en aquellas zonas donde las concentraciones de vegetación sean más altas, mediante la identificación de diferentes zonas conflictivas.

## 2.1. DATOS METEOROLÓGICOS

Como hemos mencionado en la anterior sección, nuestra metodología funciona con datos meteorológicos extraídos de modelos de baja resolución. Este tipo de modelos suelen incorporar el efecto de variables tales como la cercanía a la costa, elevación u otras variables de mayor escala, para interpolar distintas mediciones y generar un mapa de vientos de la península (o de, incluso, zonas de mayor tamaño), discretizado en bloques del orden de uno o varios kilómetros de tamaño.

Si extraemos el valor más cercano de estos modelos a la región que queremos reconstruir, tendremos un valor de viento ideal en el que la forma del terreno o la presencia de edificios a esas escalas no es tenida en cuenta. La incorporación de este tipo de efectos, así como la presencia de vegetación o zonas de agua, es precisamente la fortaleza de nuestra metodología, y se obtiene introduciendo los valores de viento a baja resolución en nuestra herramienta de simulación CFD.

Cabría preguntarse si en esta metodología podríamos introducir valores de viento *in situ*, extraídos de estaciones meteorológicas. El problema con utilizar este tipo de datos sin tratar

es que estos ya incorporan la presencia de edificios y la forma del terreno, por lo que el uso de la herramienta resultaría redundante.

Para entender mejor esta situación, es útil proponer un ejemplo. Imaginemos que queremos realizar una simulación de las corrientes de viento en nuestro dominio a partir del valor extraído de una estación meteorológica situada en el Aeropuerto de Madrid-Cuatro Caminos. Esta medida ya viene influenciada por los edificios cercanos, en caso de haberlos, además de por la forma del terreno, por lo que si introdujésemos ese valor en las condiciones de frontera de nuestro modelo, estaríamos repitiendo su efecto. Por esta razón, los datos utilizados deben ser de baja resolución, extraídos de modelos meteorológicos generales a partir del reanálisis de datos reales. El valor de las estaciones meteorológicas puede ser útil para, por ejemplo, realizar una validación de nuestra metodología, comprobando si el viento registrado dentro de la simulación CFD coincide en ese punto con lo visto en la realidad.

Esta metodología ya ha sido validada en [\[1\]](#). Por este motivo, no incluiremos datos de estaciones meteorológicas para realizar una validación de la metodología, puesto que esta ya ha sido validada en otras ocasiones.

En la próxima sección presentamos un resumen técnico del funcionamiento de nuestra herramienta, explicando qué bases de datos se utilizan para la reconstrucción de la zona, el funcionamiento general del algoritmo de reconstrucción y la incorporación de diferentes condiciones de contorno a partir de datos de viento. Posteriormente, presentaremos un estudio completo de las condiciones de viento que usaremos en nuestras simulaciones.

## 2.2. RECONSTRUCCIÓN CFD DE UN DOMINIO URBANO

Para realizar un estudio de las corrientes de aire en el dominio señalado en la Figura 1, vamos a realizar una serie de simulaciones CFD, dividiendo toda la región de unos 40 km<sup>2</sup> en varias simulaciones más pequeñas y mucho más manejables en términos computacionales. Estas simulaciones tendrán en cuenta la presencia de vegetación, edificios y la forma del terreno para realizar una aproximación de las corrientes generadas con una condición realista de viento.

Toda la información que aquí se recoge puede ser encontrada en mayor detalle en el trabajo [\[1\]](#), en el que se analizan la precisión de diversos servicios de predicción meteorológica y se comprueba la eficacia del método de generación de terreno y condiciones de contorno, haciendo uso de datos de la estación de MeteoGalicia Santiago-EOAS como validación del modelo. Esta metodología también ha sido presentada en varios congresos internacionales, por lo que cuenta con una validación que la acredita. En la Figura 2 se puede encontrar un resumen esquemático del funcionamiento de esta metodología, que detallaremos brevemente en las próximas páginas.



**Figura 2:** Resumen de la metodología utilizada para reconstruir el dominio de interés.



**Figura 3:** Vista aérea de parte del dominio de reconstrucción (extraído de Google Earth).

### 2.2.1. Tratamiento de datos LiDAR y catastrales

Uno de los pasos clave a la hora de realizar una simulación CFD consiste en la preparación de la geometría, sobre todo si trabajamos con geometrías muy complejas, en las que la incorporación de archivos externos puede dar lugar a mallas no cerradas que hacen que la simulación no funcione o, incluso, dar lugar a resultados erróneos.

Nuestro método plantea la utilización de dos tipos de datos para realizar la reconstrucción de prácticamente cualquier terreno en territorio nacional: datos catastrales, que delimitan las fronteras de los edificios, y datos LiDAR [2], en formato nube de puntos y que nos permiten conocer la altura de cada zona de interés dentro del dominio.

De una forma resumida, el algoritmo de reconstrucción lee ambos conjuntos de datos y se encarga de dos cosas: crea una malla para construir la base del terreno y triangula la frontera catastral de los edificios, levantando un polígono hasta una altura igual a la altura media de los puntos que caen dentro de dicho polígono. Como se puede comprobar en [3], este nivel de detalle con un techo plano es suficiente para la escala de precisión en la que estamos

trabajando, por lo que no resulta necesaria una reconstrucción más precisa del techo de cada edificio.

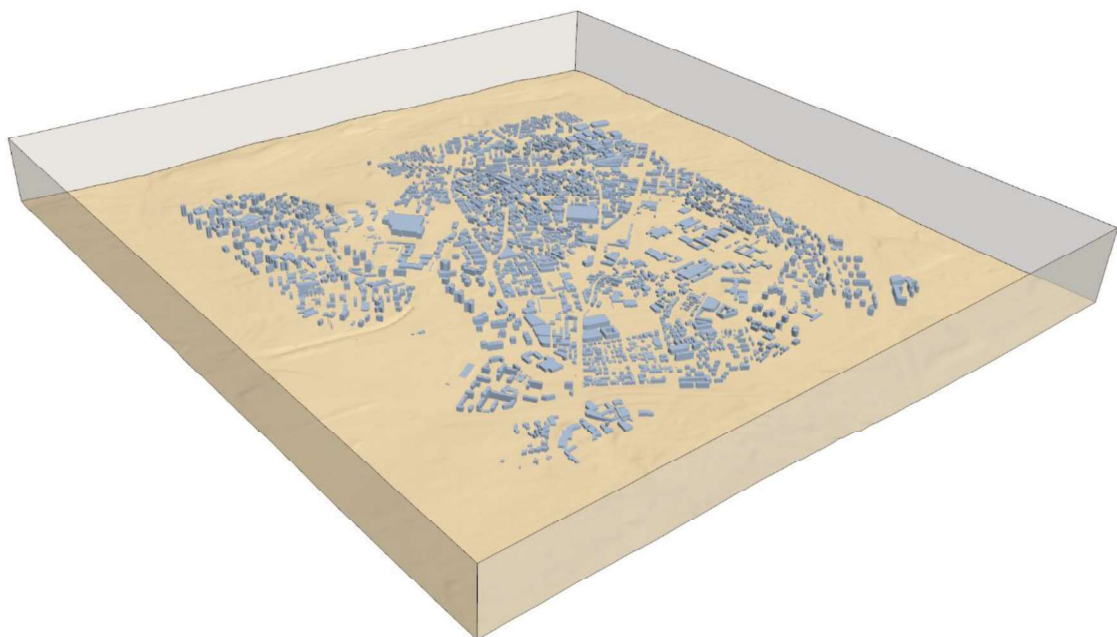
En la Figura 3 podemos observar la vista aérea de la zona reconstruida. Como vemos, se trata de una zona irregular, de un gran tamaño y con muchas calles interconectadas, en las que se pueden formar corrientes de aire muy conflictivas bajo determinadas condiciones. Como se ha mencionado, se trata de un dominio muy grande, de casi 40 km<sup>2</sup>, por lo que en este caso optaremos por dividirlo en un conjunto de 3 x 4 subdominios en los que cada simulación será ejecutada por separado. La complejidad computacional del proceso de filtrado y reconstrucción escala rápidamente con el tamaño, por lo que resulta mucho más eficiente computacionalmente hablando realizar una subdivisión del dominio en regiones más pequeñas, que son más manejables individualmente. En la Figura 4 podemos encontrar la geometría de la reconstrucción de todo nuestro dominio en vista cenital, mientras que en la



**Figura 4:** Visualización de la geometría reconstruida. El dominio total se ha dividido en 12 zonas por optimización computacional. El cuadrado rojo destaca la subregión mostrada en la Figura 5.

Figura 5 se muestra dentro del software CFD el subdominio marcado en rojo en la Figura 4.

El dominio reconstruido tiene unas dimensiones de 8,2 x 6,9 km, dando lugar a una superficie total reconstruida de 56,58 km<sup>2</sup>. La altura de la tapa superior del dominio está situada a 950 metros sobre el nivel del mar, lo que supone una altura mínima de 300 metros respecto del suelo (el suelo de la zona reconstruida oscila entre los 570 y los 700 metros sobre el nivel del mar), respetando las condiciones necesarias explicadas en [4] para que el viento que llegue a la zona de interés tenga unos resultados que no dependan de los posibles efectos de borde generados en la simulación. El proceso de subdivisión del dominio en trozos más manejables conlleva una desventaja, y es que es necesario que las distintas simulaciones independientes se superpongan para eliminar efectos de borde, por lo que de manera efectiva estaremos simulando una mayor superficie que la del dominio completo. Incluso realizando ese solapamiento entre las distintas simulaciones, esto puede resultar insuficiente, así que debemos ser capaces de interpretar correctamente los resultados de dos simulaciones contiguas. Como hemos explicado, esto es necesario por limitaciones computacionales y el escalado de los distintos algoritmos utilizados con el tamaño de la región seleccionada.



**Figura 5:** Reconstrucción de la zona marcada en rojo en la Figura 4 dentro del software de simulación CFD.

### 2.2.2. Capa límite atmosférica y modelización de la vegetación

Como hemos comentado anteriormente, generar unas condiciones de contorno adecuadas es de vital importancia para asegurar el correcto funcionamiento de las simulaciones. Aunque las físicas de la simulación estén correctamente seleccionadas, si no somos capaces de introducir unas condiciones de entrada de viento realistas, los resultados que extraigamos serán poco precisos. Para minimizar los efectos de borde, se emplearán unas condiciones de contorno que respeten las ecuaciones de la Capa Límite Atmosférica (CLA) en todo punto.

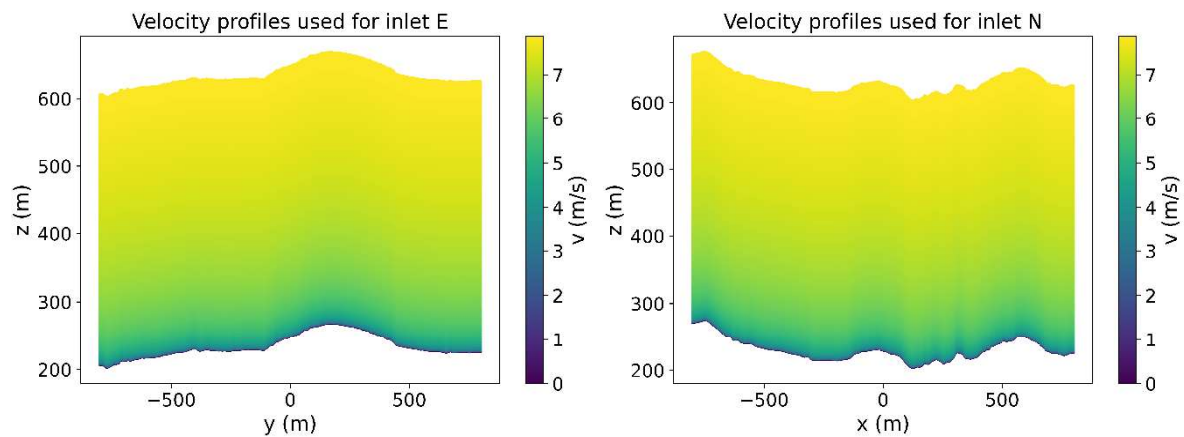
Cuando intentamos generar condiciones de contorno apropiadas, tenemos que considerar no solo la velocidad de interés, sino la altura a la que esta se da. En nuestro caso, conocemos este valor, puesto que los datos del reanálisis vienen referenciados a una determinada altura (en nuestro caso, 10 metros sobre el nivel del suelo). De forma intuitiva, podemos considerar la progresión de la velocidad del aire con la altura como una especie de capa límite, generada por la condición de no deslizamiento con el suelo. Esto significa que, a ras de suelo, la velocidad debe ser nula, y crecerá hasta tomar el valor de referencia a la altura especificada. Para modelar esto, utilizaremos la forma funcional de la Ecuación (1), muy utilizada en la literatura [5]:

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (1)$$

donde  $u_*$  es la velocidad de fricción (cuyo valor puede ser estimado si sabemos un valor de la velocidad a una determinada altura),  $\kappa = 0,41$  es la constante de Von Karman,  $z$  es la altura sobre el suelo y  $z_0$  es el parámetro de rugosidad, cuyos valores típicos pueden ser vistos en la Tabla 1 dependiendo del tipo de superficie considerada. El valor del parámetro de rugosidad controla cómo de rápido la velocidad asciende hasta llegar a la condición impuesta por  $u_*$ , por lo que valores más bajos de  $z_0$  implican un mayor ritmo de crecimiento de la velocidad.

**Tabla 1:** Rango de valores típicos de  $z_0$ , extraído de [6].

<i>Surface Type</i>	<i>Roughness length (m)</i>
<i>Sea, loose sand, snow</i>	0.0002
<i>Concrete, flat desert, tidal flat</i>	0.0002-0.0005
<i>Flat snow field</i>	0.0001-0.0007
<i>Rough ice field</i>	0.001-0.012
<i>Fallow ground</i>	0.001-0.004
<i>Short grass and moss</i>	0.008-0.03
<i>Long grass and heather</i>	0.02-0.06
<i>Low mature agricultural crops</i>	0.04-0.09
<i>High mature crops ("grain")</i>	0.12-0.18
<i>Continuous bushland</i>	0.35-0.45
<i>Mature pine forest</i>	0.8-1.6
<i>Dense low buildings ("suburb")</i>	0.4-0.7
<i>Regularly-built large town</i>	0.7-1.5
<i>Tropical forest</i>	1.7-2.3



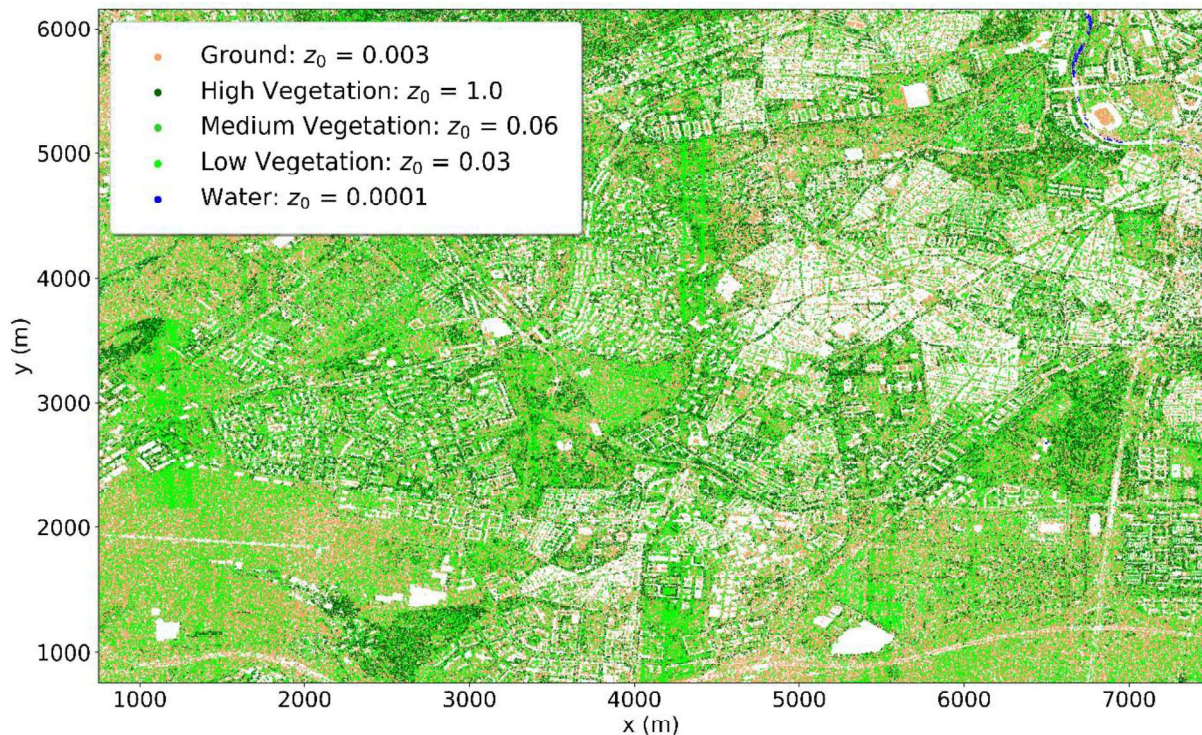
**Figura 6:** Condiciones de contorno generadas para un caso de ejemplo. La ecuación (1) se conserva en todo punto de la frontera lateral.

Nuestro programa de procesamiento de datos tiene varios cometidos fundamentales en la ejecución de todo el proceso de simulación. Además de generar las geometrías del terreno y de los edificios de la manera explicada anteriormente, también toma los datos de viento que se le introduzcan para generar todas las condiciones de contorno de cada una de las simulaciones, siguiendo la ecuación de la CLA establecida en la Ecuación (1). Esto no es trivial, ya que hay que tener en cuenta la forma del terreno y generar los perfiles de velocidad adecuados, de forma que la ecuación se verifique para todo punto. En la Figura 6 podemos ver una gráfica de las condiciones de contorno laterales generadas para una geometría de ejemplo con un viento de componente noreste (NE).

Cuando hablamos de simulaciones en entornos urbanos, existen varios factores importantes para tener en cuenta a la hora de analizar las variables que influyen en las corrientes de aire que se generan: la orografía, la presencia de edificaciones y la vegetación. Para el caso que estamos considerando en la región suroeste de la ciudad de Madrid, la presencia de vegetación es de vital importancia, y su efecto a gran escala sobre las líneas de viento es algo que nuestro método tiene en cuenta.

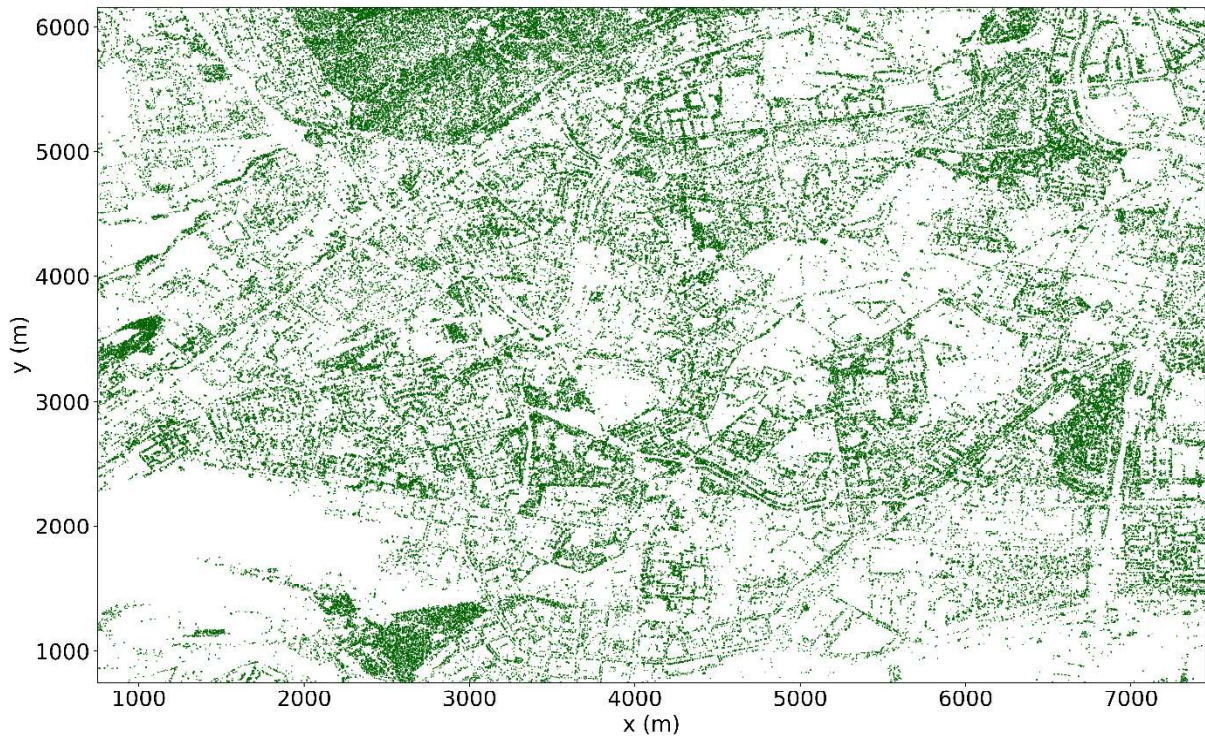
En este tipo de simulaciones, otras metodologías no tienen en cuenta la presencia de árboles y otros tipos de vegetación, ya que la altura de los edificios suele ser lo suficientemente elevada como para que a menudo puedan despreciarse. Sin embargo, cuando trabajamos con índices de urbanidad más bajos o analizando a menor altitud, suele ser fundamental modelizar la presencia de vegetación en el suelo. No obstante, no se trata de una tarea trivial. Algunas aproximaciones de CFD urbano modelan manualmente la presencia de vegetación [7], lo cual es una tarea tediosa y una metodología difícilmente generalizable. Existe una forma más sencilla de modelar esto, que no sólo tiene en cuenta la presencia de árboles, sino también de vegetación más baja, como hierba o cultivos agrícolas. Este método, propuesto en otras metodologías como en [8], modela el terreno con una función de pared rugosa. El software utilizado para las simulaciones CFD nos permite aplicar este concepto a cada superficie de nuestra geometría. Utilizando un archivo de datos que le proporcione al programa el valor en cada punto, podemos utilizarlo para modelar la presencia de vegetación en el suelo del dominio, utilizando los valores referenciados para el parámetro de rugosidad especificados en la Tabla 1. El resto de las paredes de la simulación, incluidas las superficies de los edificios, se modelan como lisas.

Un ejemplo de la aplicación de este concepto puede verse en la Figura 7, donde se representan diferentes puntos LiDAR etiquetados según el tipo de terreno, y su valor de rugosidad  $z_0$  asociado, correspondientes además a la reconstrucción de nuestro dominio. Estos datos de vegetación también los utilizaremos en el análisis de los resultados para encontrar aquellas zonas más susceptibles de sufrir rachas de viento muy fuertes, por lo que supone un muy buen indicador para orientar el trabajo y buscar las zonas más conflictivas.



**Figura 7:** Clasificación de la nube de puntos según su etiqueta, que permite la visualización del tipo de suelo en cada zona del dominio.

La escala de los ejes en la Figura 7 representa distancias reales, pero no empieza en el origen de coordenadas puesto que hemos despreciado los primeros cientos de metros en cada uno de los bordes debido a la proximidad con las condiciones de contorno, lo que hace que los datos en esa zona no sean lo suficientemente representativos. No obstante, sirven como una buena referencia para hacernos a la idea de la escala del dominio con el que estamos trabajando. Para una mejor visualización de las regiones de mayor concentración de vegetación alta, mostramos en la Figura 8 solo aquellos puntos etiquetados como vegetación alta (i.e., arbustos grandes y, sobre todo, árboles). Podemos ver en dicha Figura algunas acumulaciones de árboles, que se corresponden con algunos parques de la región (Parque de las Cruces, de la Cuña Verde, de San Isidro o de Pradolongo). En la discusión de los resultados volveremos a analizar esta Figura, etiquetando las zonas de interés que encontremos.



**Figura 8:** Representación de los puntos de alta vegetación en la reconstrucción de nuestro dominio.

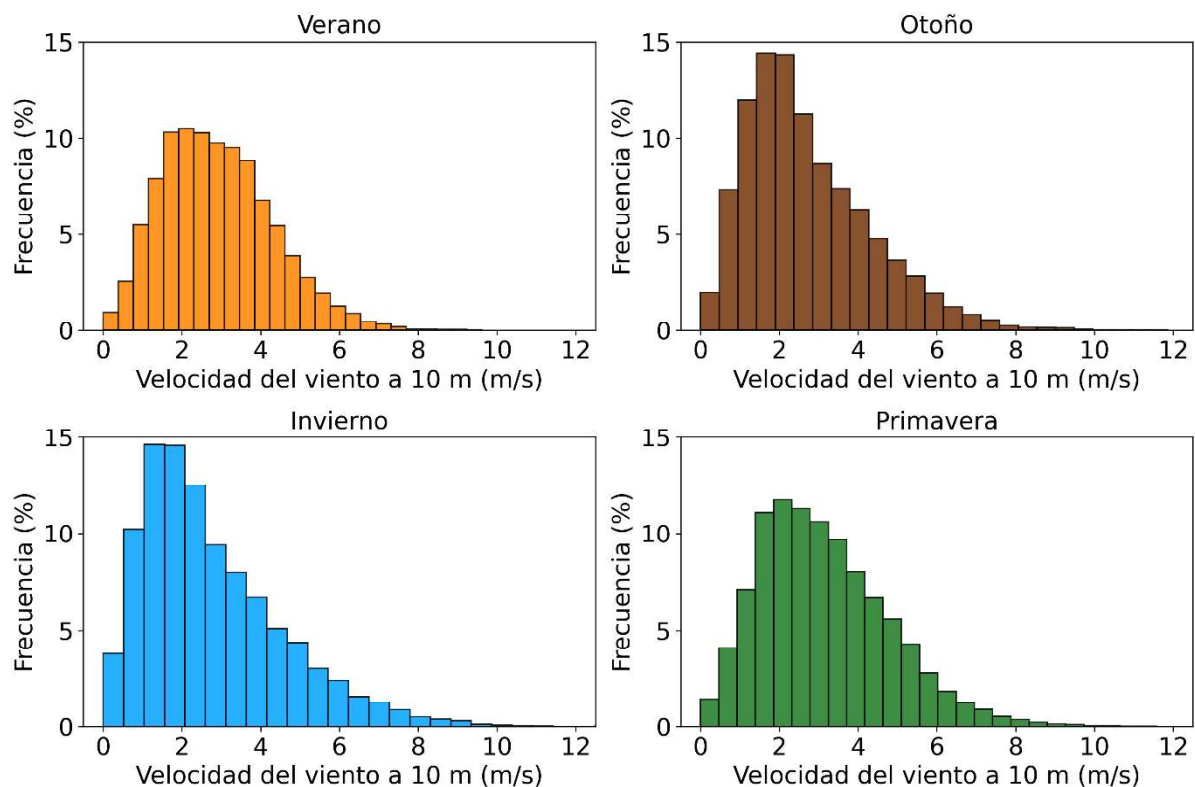
### 3. RESULTADOS

En la presente sección presentaremos los principales resultados de este informe. En primer lugar, comenzaremos realizando un análisis estacional, con el fin de extraer las condiciones de viento estadísticamente más significativas en la ciudad de Madrid. En virtud de los datos extraídos, realizaremos una serie de simulaciones que nos darán una idea del tipo de circulación de aire que nos encontraremos en la ciudad en los días más típicos. Puesto que uno de nuestros objetivos consiste en encontrar puntos conflictivos en situaciones principalmente desfavorables, en las que las condiciones de viento sean mucho más comprometedoras, realizaremos un estudio de los últimos frentes con grandes rachas de viento, analizando las direcciones y velocidades alcanzadas. Una vez hecho esto, ejecutaremos otras simulaciones de este tipo de situaciones, y las utilizaremos como referencia para localizar regiones en las que se produzcan grandes aceleraciones de viento, además de identificar zonas que, por su naturaleza, puedan resultar peligrosas para el tránsito en días con condiciones desfavorables. Para ello, compararemos los resultados de las simulaciones de

los días más representativos con aquellas correspondientes a las situaciones límite. En esta próxima sección comenzaremos presentando un análisis estadístico con datos históricos de viento en la ciudad de Madrid, y obtendremos aquellos casos de viento estadísticamente más significativos.

### 3.1. CONDICIONES METEOROLÓGICAS MÁS REPRESENTATIVAS

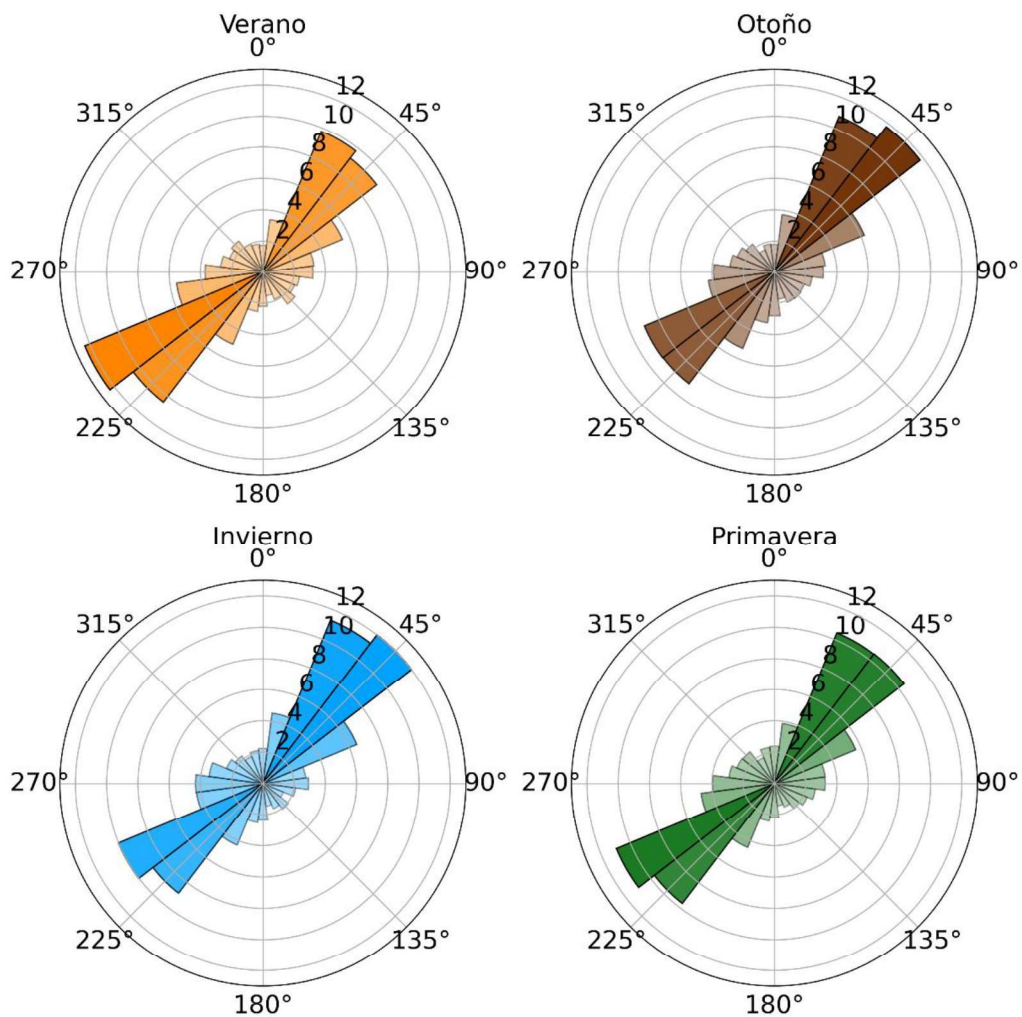
Vamos a comenzar nuestro estudio presentando los resultados del estudio estacional de viento para la ciudad de Madrid. Como hemos comentado, nuestra metodología se alimenta de datos meteorológicos de baja resolución, por lo que serán los que utilizaremos como referencia para introducir en las simulaciones. Por ello, hemos descargado una serie temporal de datos de viento desde enero de 2010 hasta julio de 2025, y hemos realizado un filtrado de los datos de dirección y velocidad del viento a 10 metros de altura sobre el suelo.



**Figura 9:** Histograma de velocidades del viento para las cuatro estaciones del año.

En la Figura 9 presentamos el histograma de velocidades de viento para cada una de las cuatro estaciones del año. Para realizar la separación entre estaciones se ha utilizado el convenio meteorológico:

- **Invierno:** diciembre, enero y febrero.
- **Primavera:** marzo, abril y mayo.
- **Verano:** junio, julio y agosto.
- **Otoño:** septiembre, octubre y noviembre.



**Figura 10:** Histograma radial de las direcciones de viento predominantes en Madrid, separado por estaciones del año. El largo de cada barra representa el porcentaje de veces que se da una determinada dirección de viento.

Como se puede comprobar, el verano es la estación con una distribución más plana en cuanto a velocidad de viento, y vemos que para el caso del invierno existe un pico algo más alto, manteniendo una cola con valores algo más elevados. En general, la velocidad típica en cualquiera de las estaciones es bastante constante y no existen grandes diferencias, aunque sí que se aprecia una cierta distinción si analizamos el máximo registrado en cada una de las cuatro estaciones. Mientras que en verano el máximo registrado es de 9.6 m/s, el valor máximo en invierno asciende hasta los 13.0 m/s, evidenciando la tendencia a eventos de viento fuerte más comunes en invierno.

Estos datos por sí mismos no nos sirven para seleccionar las condiciones más representativas, aunque sí nos sirven como punto de partida. Para continuar con nuestro análisis, presentamos en la Figura 10 un diagrama circular de la distribución de frecuencias de cada una de las direcciones de viento.

Como podemos observar, en las cuatro estaciones existen dos direcciones principales de viento:  $45^\circ$  (nordeste, NE) y  $225^\circ$  (suroeste, SO). En el total de los datos, estas dos direcciones acumulan más de la mitad de los casos totales, y si incorporamos las direcciones cercanas ( $20^\circ$ - $70^\circ$  y  $200^\circ$ - $250^\circ$ ) el porcentaje asciende hasta el 70%. Por lo tanto, la consideración de estas dos direcciones principales cubre la mayoría de los casos de interés, y el resto de las direcciones se corresponden con casos más aislados. Para completar este análisis preliminar, se presenta también en la Figura 11 la distribución total de todos los puntos de los que disponemos en un diagrama polar, en el que la distancia al centro se corresponde con la velocidad del viento, y el ángulo respecto del centro con la dirección del viento (norte hacia arriba). Para acabar, enseñamos en la Figura 12 la mediana de la velocidad para cada una de las direcciones de la Figura 10.

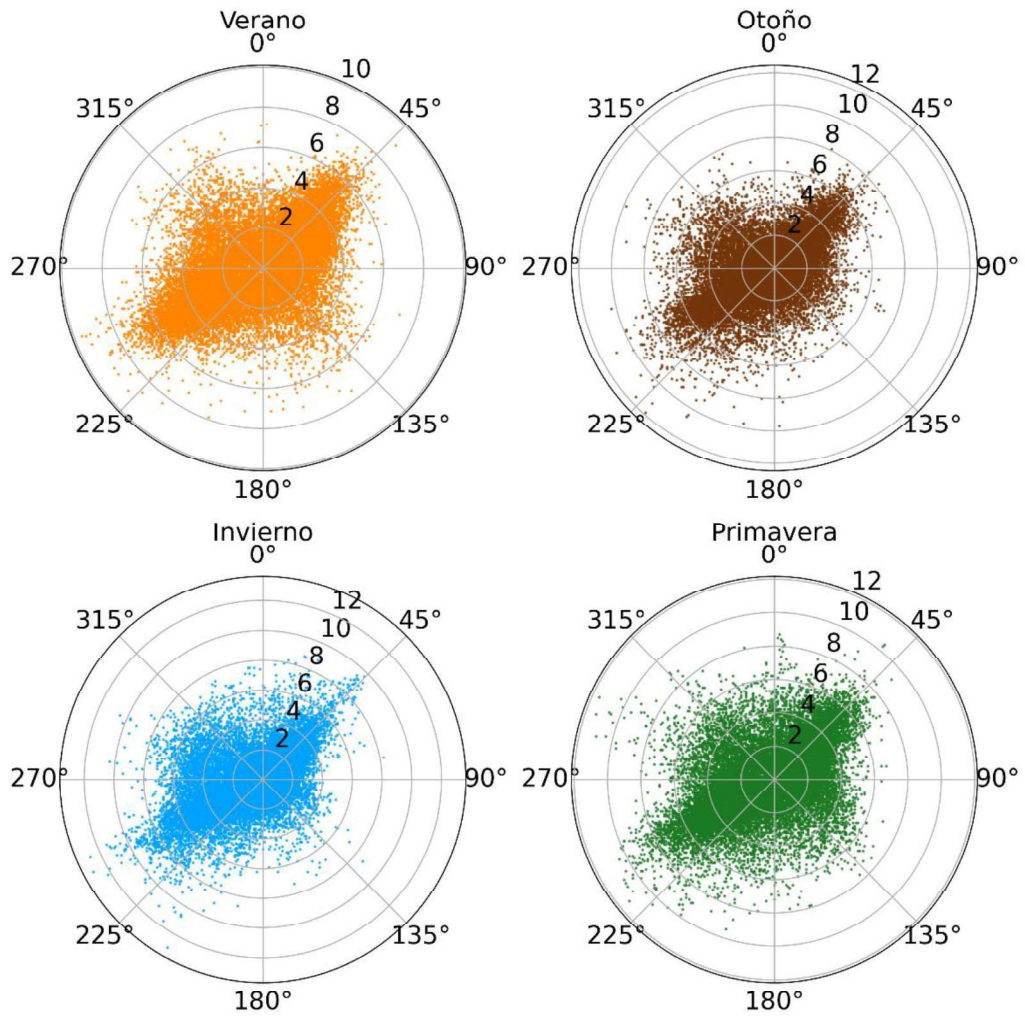
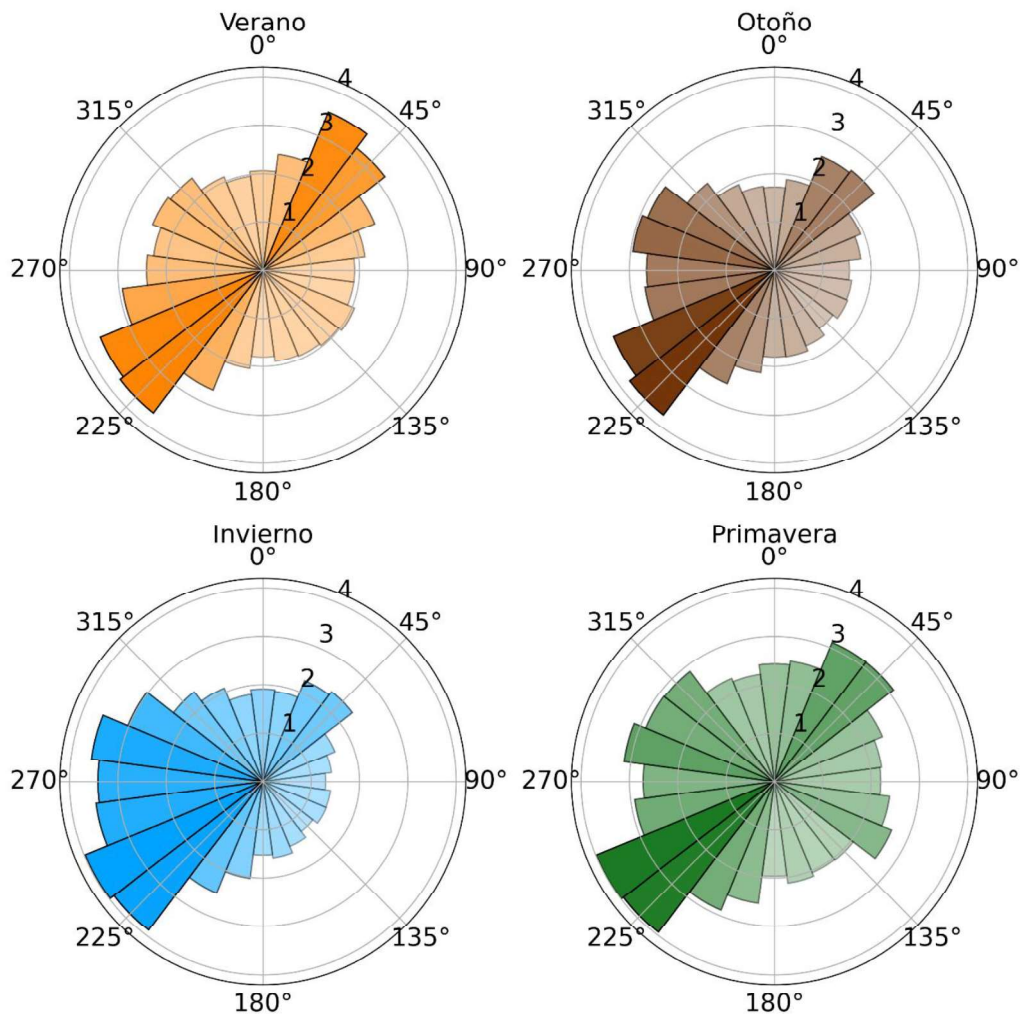


Figura 11: Distribución de dirección y velocidad de viento en la serie de datos extraídos (2010-2025).



**Figura 12:** Mediana de la velocidad para cada una de las direcciones de viento.

Viendo los datos presentados en la Figura 12, podemos observar además que la velocidad de viento más probable (mediana) es ligeramente mayor en ciertas estaciones como la primavera, el otoño y el verano para las direcciones principales de la Figura 10. Esto significa que existe la posibilidad de que el resto de las direcciones sean residuales, en el sentido de que son registradas con menores direcciones de viento en momentos en los que las condiciones meteorológicas no están bien definidas (por ejemplo, en cambios de tiempo atmosférico). Es por esta razón por la que vamos a mantener la elección realizada antes, y nos quedaremos con las dos direcciones principales que, por simplicidad, escogeremos como 45° (NE) y 225° (SO). Por tanto, para las simulaciones de las condiciones más significativas, escogeremos estos dos casos principales.

Quedaría por escoger las velocidades para cada uno de los casos. Como estamos trabajando con condiciones lo más representativas posible, vamos a escoger la mediana de cada dirección. La mediana de una distribución estadística se define como aquel valor que hace que el 50% de los valores estén por encima y el otro 50% por debajo, por lo que se define como una magnitud estadística de gran importancia a la hora de analizar las situaciones estadísticamente más significativas.

En la Tabla 2 presentamos las velocidades y direcciones escogidas para las simulaciones de referencia con condiciones típicas. Estos valores serán los que introduciremos en nuestra herramienta de reconstrucción, para poder generar unos patrones de viento típicos en las calles de nuestro dominio en las situaciones de viento más comunes de la ciudad.

**Tabla 2:** Condiciones de viento más representativas.

	Caso 1	Caso 2
Velocidad (m/s)	2.8	3.5
Dirección (º)	45 (NE)	225 (SO)

### 3.2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADVERSAS

Como hemos recalcado anteriormente, el principal objetivo de este trabajo consiste en encontrar aquellas condiciones de viento especialmente perjudiciales para el entramado urbano de la zona suroeste de la ciudad de Madrid. Para ello, hemos presentado un análisis de las condiciones de viento más representativas. El objetivo es comparar los resultados de las simulaciones con este tipo de condiciones de contorno con aquellas extraídas de fenómenos extremos, tales como borrascas, ciclogénesis explosivas o incluso la reciente DANA. Si bien esta última no produjo unas rachas de viento excesivamente fuertes, sino que descargó una gran cantidad de precipitaciones, puede ser de gran utilidad por motivos que quedarán más claros al final de esta sección.

En esta sección presentaremos las condiciones de viento de diferentes fenómenos meteorológicos extremos, con el fin de compararlos con las condiciones más representativas extraídas en la anterior sección.

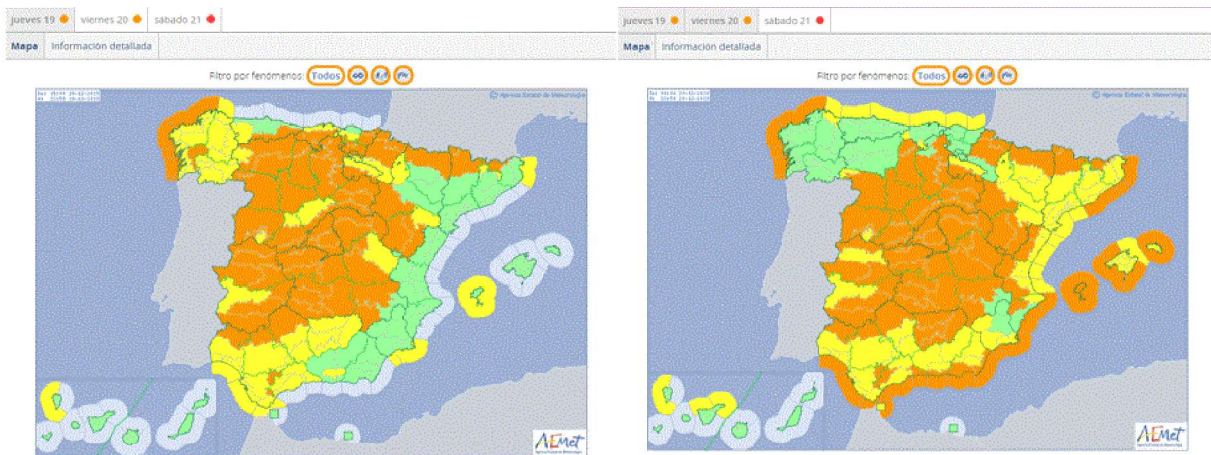
### 3.2.1. Borrasca Elsa

Según la página oficial de AEMET, la borrasca Elsa fue nombrada por el Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) el lunes 16 de diciembre del año 2019, momento en el que la anterior borrasca, Daniel, estaba afectando a zonas del sur de España. A diferencia de esta, Daniel se formó a gran distancia de la Península Ibérica, como parte de una amplia circulación zonal muy húmeda e intensa que atravesaba todo el Atlántico. Los efectos más directamente asociados a Elsa se dieron en España desde el miércoles 18 al viernes 20, pero el temporal asociado a la circulación zonal se mantuvo toda la semana.

El día 16 de diciembre AEMET emitió una **nota informativa** en relación con la borrasca Elsa en la que se comunicaba lo siguiente:

*Una profunda y amplia borrasca atlántica, nombrada "Elsa", dará lugar a un temporal de lluvia y viento en prácticamente todas las zonas peninsulares a partir de la mañana del miércoles, día 18, alcanzando posteriormente el área mediterránea. El archipiélago canario quedará al margen de esta situación. La borrasca lleva asociados varios sistemas frontales muy activos que se desplazarán de oeste a este por la Península con lluvias generalizadas, persistentes y localmente fuertes en amplias zonas, siendo el área mediterránea y el Cantábrico oriental donde se prevén menos copiosas. Las mayores acumulaciones, muy probablemente con más de 100 mm, se esperan en áreas de Galicia y mitad occidental del Sistema Central. La cota de nieve estará muy alta al inicio del episodio, lo que producirá el deshielo de la nieve acumulada durante los días previos; podría ser significativo principalmente en la Cordillera Cantábrica donde se esperan nevadas copiosas a lo largo del lunes y martes.*

*El viento será un fenómeno muy adverso y generalizado estos días; se esperan rachas muy fuertes de viento del suroeste y oeste en todas las zonas peninsulares alcanzando el área mediterránea probablemente a partir de la tarde del jueves. Es muy probable que las rachas de viento superen los 100 km/h de forma bastante generalizada en áreas del noroeste, del cuadrante suroeste y de la zona centro, y los 120 km/h en todos los sistemas montañosos. El temporal provocará mal estado de la mar en las zonas costeras, principalmente en las zonas atlánticas.*

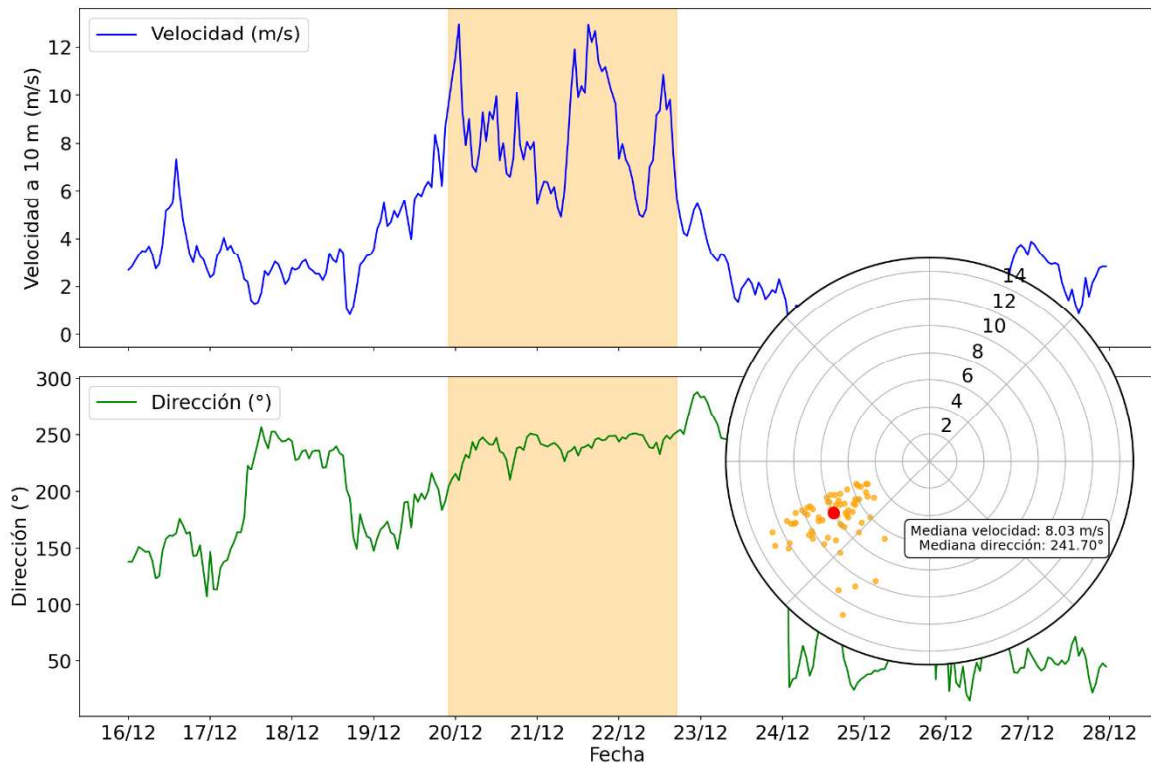


**Figura 13:** Avisos en vigor para los días 19 y 20 de diciembre de 2019 por viento y lluvia, durante los días de mayor impacto de la borrasca Elsa.

Los efectos más destacados de la borrasca Elsa se debieron a las lluvias intensas y persistentes, al viento fuerte con rachas muy fuertes, incluso huracanadas, así como al fuerte oleaje en las zonas costeras. Como consecuencia de todos estos fenómenos adversos hubo que lamentar **el fallecimiento de seis personas** entre los días 19 y 21 (inicio de la borrasca Fabien) por diversas causas y en distintos lugares: Santiago de Compostela, Puenxo (Asturias), Vegas del Condado (León), Madrid, Huéscar (Granada) y Punta Umbría (Huelva). En cuanto a las rachas de viento en la zona central de la península, destacamos valores de hasta 121 km/h en el Puerto de Navacerrada.

En el contexto concreto de la ciudad de Madrid, se registró el fallecimiento de una mujer tras ser alcanzada por cascotes desprendidos de un edificio y, como medida de protección ante vientos fuertes, se cerró el Parque del Retiro. Queda clara, pues, la importancia del estudio de los efectos de este fenómeno meteorológico extremo, así como de las distintas zonas de recirculación generadas debido a tales rachas de viento.

En la Figura 13 podemos ver los avisos meteorológicos emitidos por AEMET en los días previos al impacto de la borrasca, mientras que la Figura 14 representa los datos de viento extraídos por el reanálisis de OpenMeteo.



**Figura 14:** Evolución de la velocidad y dirección del viento durante los momentos de mayor impacto de la borrasca Elsa en la ciudad de Madrid.

Como podemos ver en la zona marcada de naranja en la Figura 14, los mayores valores de viento en Madrid se registraron entre los días 20 y 22 de diciembre, un poco más tarde de los principales avisos dados por AEMET. Esto tiene cierto sentido si nos atenemos a la localización de Madrid dentro de la Península, propiciando una llegada más lenta de la borrasca comparada con zonas del noroeste peninsular.

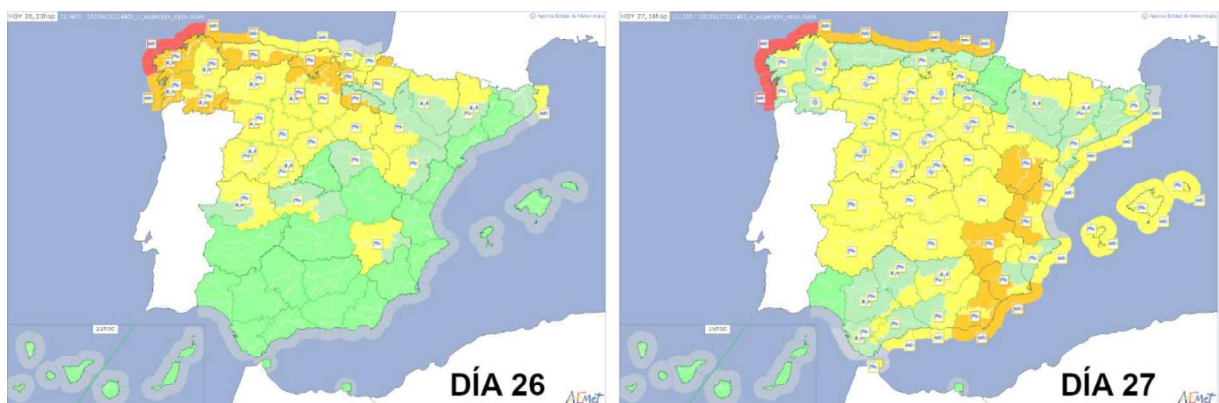
Para nuestra simulación, hemos escogido el valor mediano de los puntos resaltados (es decir, aquel que deja el 50% de los valores por debajo y el otro 50% de los valores por encima), tanto para la dirección como para la velocidad del viento. Esto hace que trabajemos con unas condiciones más estándar dentro del fenómeno meteorológico, sin irnos a valores residuales muy extremos. Como vemos, la mediana de la velocidad es mucho mayor que el caso 2 de la Tabla 2, mientras que estaremos trabajando con una dirección de viento muy parecida (componente suroeste). La ejecución de esta simulación nos permitirá una comparativa bastante interesante entre una condición extrema con viento del suroeste y una condición

más típica, afinando la búsqueda de zonas de interés, en las que el viento intenso deje ver zonas que acarreen algún tipo de peligro para la movilidad de las personas o para el entramado viario de la ciudad, con especial atención en las zonas de alta vegetación.

Para completar el estudio, presentaremos a continuación también otra borrasca importante con condiciones de viento bastante parecidas.

### 3.2.2. Borrasca Herminia

La borrasca Herminia fue nombrada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) el 24 de enero de 2025. En el aviso posterior a su nombramiento se informaba sobre un temporal generalizado en la península ibérica y, en menor medida, en las Islas Baleares. Se esperaban rachas de viento muy fuertes, precipitaciones abundantes y fuerte oleaje. Los efectos de la borrasca sobre la Península fueron muy significativos. La región más afectada fue el cuadrante noroccidental, pero los impactos se extendieron por gran parte del territorio, afectando a zonas del sistema Central. Las rachas de viento (a menudo huracanadas), la lluvia, la nieve y el oleaje generaron miles de incidencias que afectaron al tráfico rodado, ferroviario, aéreo y marítimo, y ocasionaron un gran número de desperfectos en zonas rurales y urbanas.

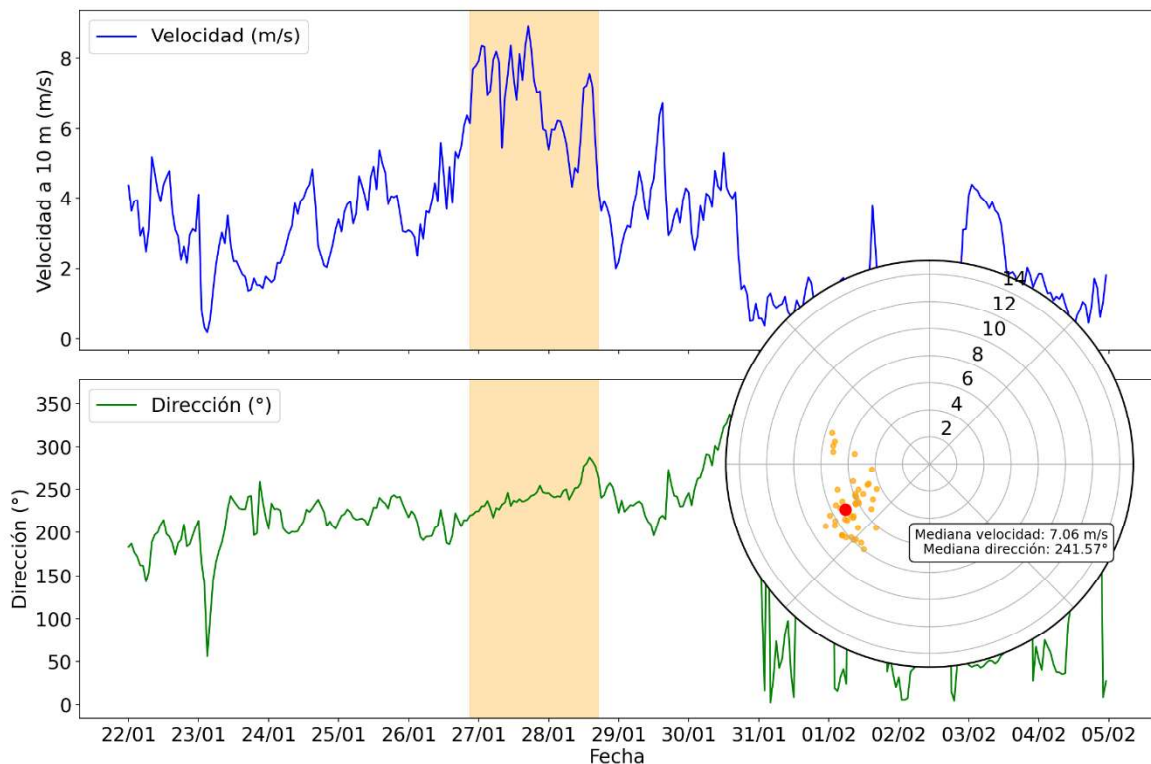


**Figura 15:** Avisos en vigor para los días 26 y 27 de enero de 2025 por viento y lluvia, durante los días de mayor impacto de la borrasca Herminia.

La borrasca Herminia registró entre el 26 y el 28 de enero un temporal muy adverso en España, como se puede ver en la Figura 15, con numerosos avisos por oleaje, viento, lluvia y nieve.

Galicia fue la zona más afectada, con oleaje rojo, acumulaciones de lluvia superiores a 150 mm y múltiples rachas huracanadas. El viento provocó los impactos más importantes: caída de árboles, daños en edificaciones, cortes eléctricos y problemas en carreteras, ferrocarriles y aeropuertos. También se produjeron inundaciones en Galicia y Castilla y León, así como nevadas en varios sistemas montañosos. El oleaje causó daños en la costa cantábrica, incluido el colapso de un dique en Asturias.

En el caso concreto de Madrid, además de la inestabilidad asociada al paso de la borrasca, se registraron rachas de viento significativas. Si bien es cierto que no existieron fuertes alertas para la ciudad y no existió la necesidad de tomar medidas significativas, la Figura 16 muestra valores de viento relativamente intensos.



**Figura 16:** Evolución de la velocidad y dirección del viento durante los momentos de mayor impacto de la borrasca Herminia en la ciudad de Madrid.

De manera análoga al caso de la borrasca Elsa, hemos escogido el período de mayor incidencia de la borrasca, señalado en color naranja en la Figura 16, y hemos calculado el valor mediano

de velocidad y dirección de viento para utilizarlo como referencia en nuestra simulación. Para este caso, tenemos un viento de componente suroeste (SO), con un ángulo de 241,57º respecto de la dirección norte, con una velocidad de 7,06 m/s, no mucho más baja que para el caso de la anterior borrasca.

Con la inclusión de esta segunda borrasca podemos ver que este tipo de fenómenos atmosféricos suelen venir asociados con vientos del suroeste, que se corresponde justo con el caso 2 de la Tabla 2.

Nuestro objetivo en la próxima sección va a ser encontrar algún tipo de condición desfavorable en la que la dirección típica de viento sea de componente Noreste (NE), que es justo el Caso 1 dentro de las condiciones más representativas introducidas con anterioridad. En caso de encontrarlo, tendríamos para cada caso más representativo una contraparte con similar dirección de viento pero velocidades mucho mayores, lo cual ayudará enormemente a nuestro análisis.

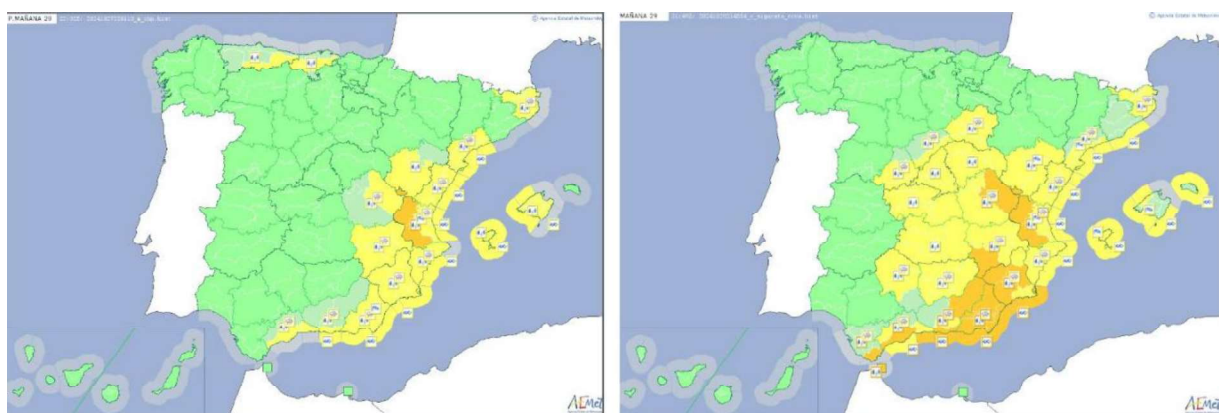
### 3.2.3. DANA de Valencia

Según el informe elaborado por AEMET, la DANA del 29 de octubre de 2024 se originó cuando una depresión aislada en niveles altos (DANA) quedó establecida en el sur peninsular, generando un transporte muy intenso de aire cálido y húmedo desde el Mediterráneo hacia el interior. Esta configuración favoreció el desarrollo de núcleos convectivos persistentes y estacionarios que dieron lugar a precipitaciones extraordinarias en varias zonas del este peninsular, convirtiéndose en uno de los episodios de lluvia más significativos del año y contribuyendo a que octubre de 2024 fuera el mes más lluvioso de toda la serie histórica en España. En los días previos AEMET fue actualizando los avisos, inicialmente amarillos el 27, pasando a naranja el día 28 y culminando en avisos rojos durante la mañana del 29, cuando la organización convectiva ya mostraba claramente su carácter extremo. El episodio provocó inundaciones súbitas, desbordamientos de cauces, afecciones a infraestructuras de transporte y daños considerables en distintos ámbitos urbanos y rurales, además del fallecimiento de más de 200 personas.

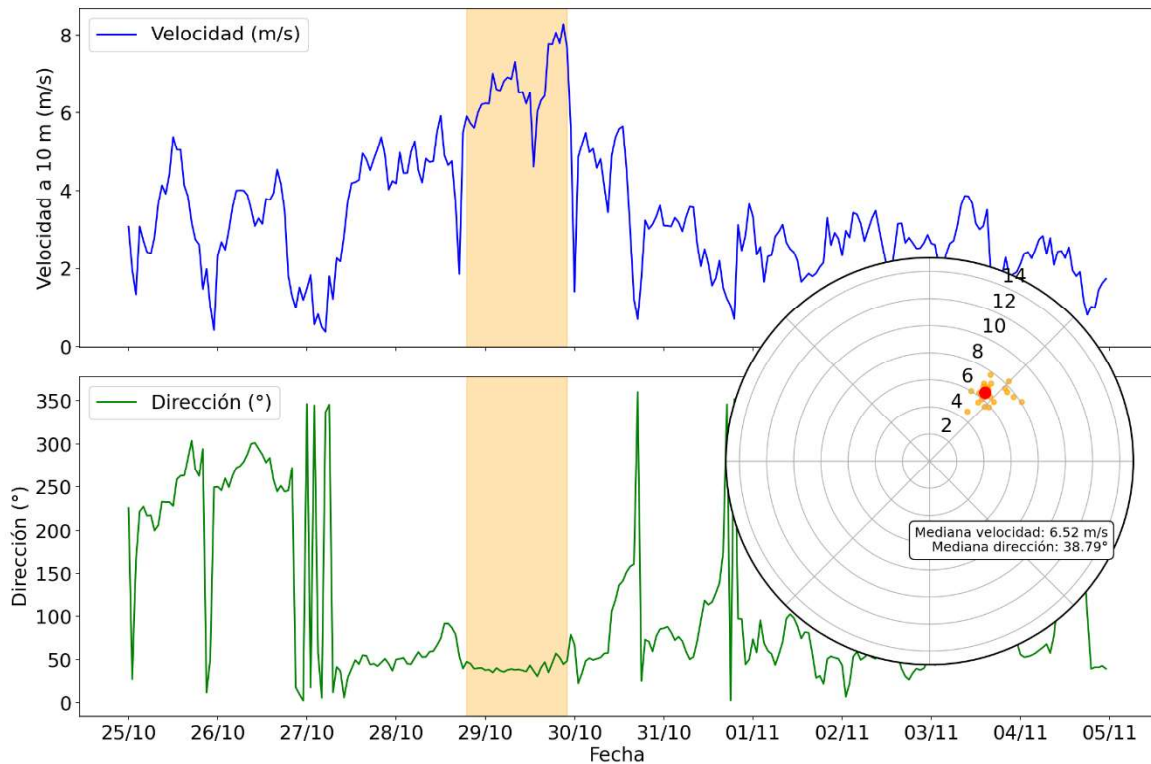
Aunque los registros más elevados se concentraron en zonas del Levante peninsular, la DANA también afectó a Madrid, con un aumento claro de la inestabilidad atmosférica, precipitaciones localmente intensas y rachas de viento significativas asociadas tanto a la circulación sinóptica como a reactivaciones convectivas puntuales. Sin alcanzar los valores extremos de otras regiones, el episodio ofrece un caso útil para el análisis en Madrid, al mostrar cómo un sistema organizado lejos del centro peninsular puede inducir efectos relevantes en la meseta, especialmente en cuanto a viento y episodios de lluvia concentrada. Desde el punto de vista metodológico, el estudio de este temporal permite comprender mejor la respuesta de la capital ante escenarios de precipitaciones intensas y evaluar el comportamiento de la circulación en situaciones de inestabilidad no directamente vinculadas a una borrasca profunda.

Como hemos mencionado, este caso resulta particularmente interesante para la comparación con otros episodios analizados: mientras que las borrascas previas estuvieron dominadas por vientos del suroeste (SO), la DANA de finales de octubre se caracterizó por una circulación predominante de componente noreste (NE), lo que permite contrastar dos configuraciones atmosféricas muy distintas y estudiar cómo cada una de ellas condiciona la distribución del viento, la intensidad de las rachas y las zonas de mayor exposición dentro de Madrid.

En la Figura 17 se presenta un resumen de los avisos por viento y lluvia los días previos al mayor impacto de la DANA, mientras que la Figura 18 detalla los valores de viento recogidos por las predicciones de baja resolución utilizadas en nuestras simulaciones.



**Figura 17:** Avisos previstos para el día 29 de octubre durante los días 27 y 28 de octubre de 2024, durante los días de mayor impacto de la DANA.



**Figura 18:** Evolución de la velocidad y dirección del viento durante los momentos de mayor impacto de la DANA en la ciudad de Madrid.

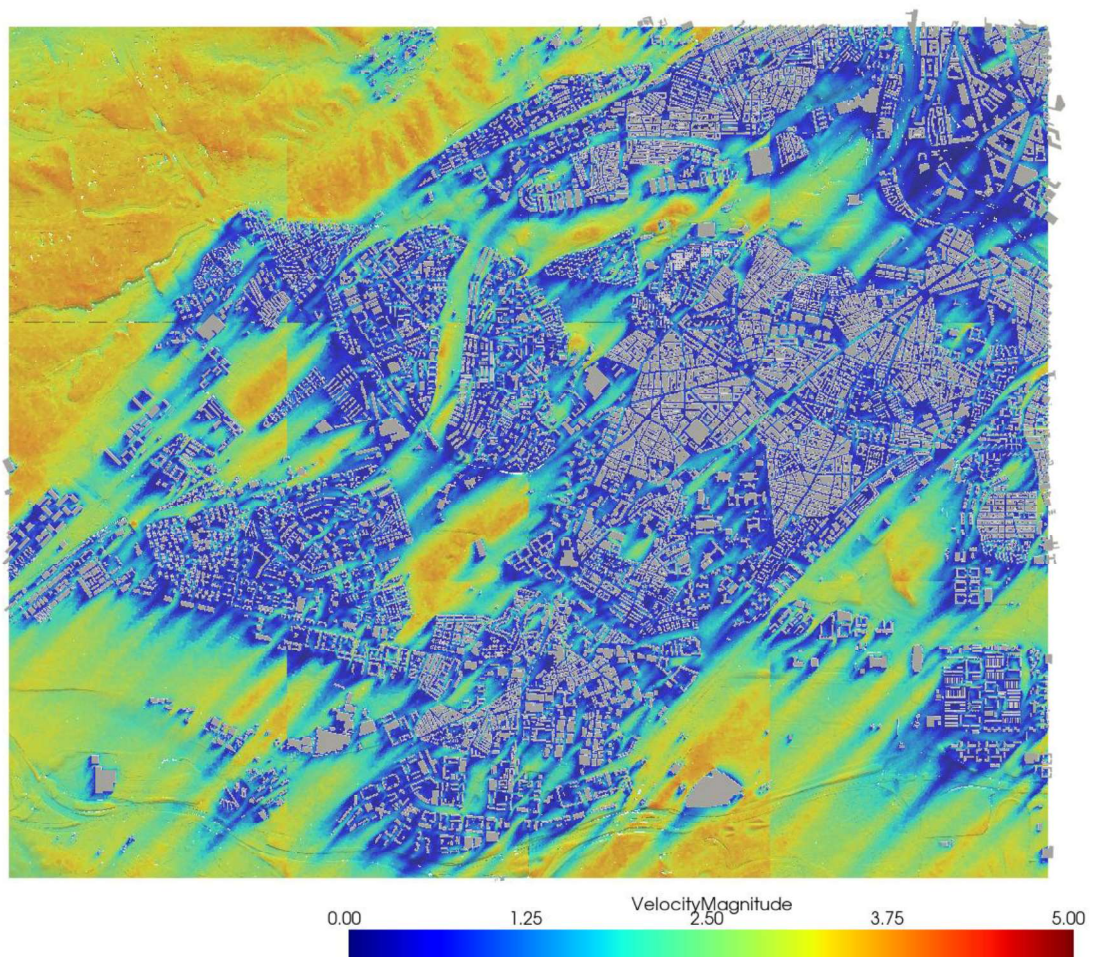
Como se puede observar, el día 29 de octubre supuso el día de mayor incidencia, alcanzando una mediana para la velocidad del viento comparable a la de las otras borrascas con componente suroeste, generalmente asociadas a borrascas. La obtención de una simulación para cada uno de los valores de viento nos permitirá realizar una comparativa para cada caso de condición más representativa, comparando aquellos casos con velocidades moderadas con aquellos otros más extremos. En la siguiente sección presentaremos de forma general los resultados de las cinco simulaciones, y posteriormente analizaremos las distintas regiones de interés.

### 3.3. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Vamos a presentar ahora el resultado conjunto de cada uno de los casos simulados: los dos casos más representativos junto con las tres condiciones de inestabilidad presentadas.

Posteriormente, haciendo un análisis conjunto con la Figura 8, procederemos a detectar los principales puntos críticos con mayor densidad de vegetación, y haremos una comparativa de los distintos resultados simulados. Por mayor completitud, representaremos los campos de velocidades de viento a 2 y 5 metros respecto de la altura del suelo, aunque el valor que nos resultará de mayor utilidad será aquel dado a 2 metros, puesto que se trata del más cercano a la altura de paso de una persona. Por esta razón, el plano a 2 metros del suelo será el que usemos en la mayoría de nuestro análisis de los resultados.

### 3.3.1. Caso 1: $v = 2,8 \text{ m/s}$ (NE)



**Figura 19:** Campo de velocidades a 2 metros de altura para el Caso 1.

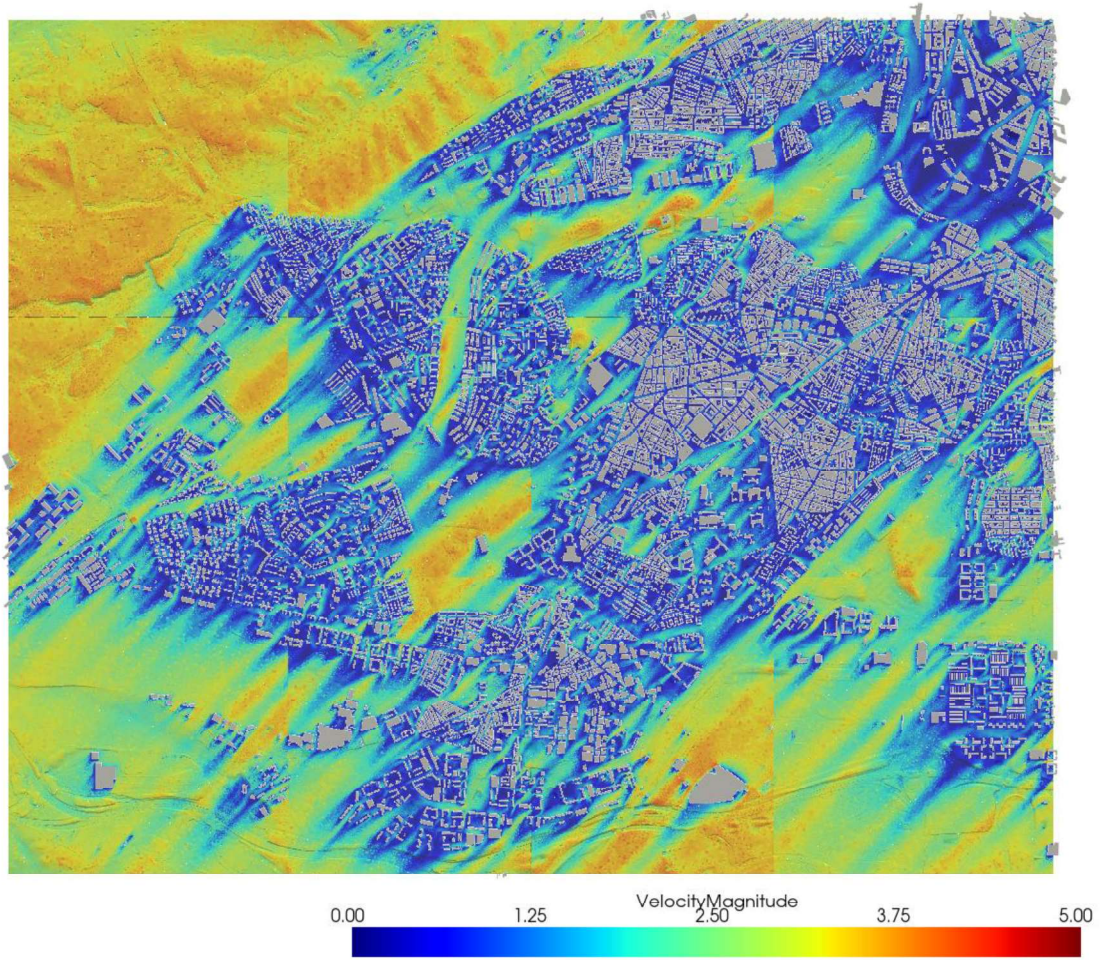


Figura 20: Campo de velocidades a 5 metros de altura para el Caso 1.

3.3.2. Caso 2:  $v = 3,5 \text{ m/s}$  (SO)

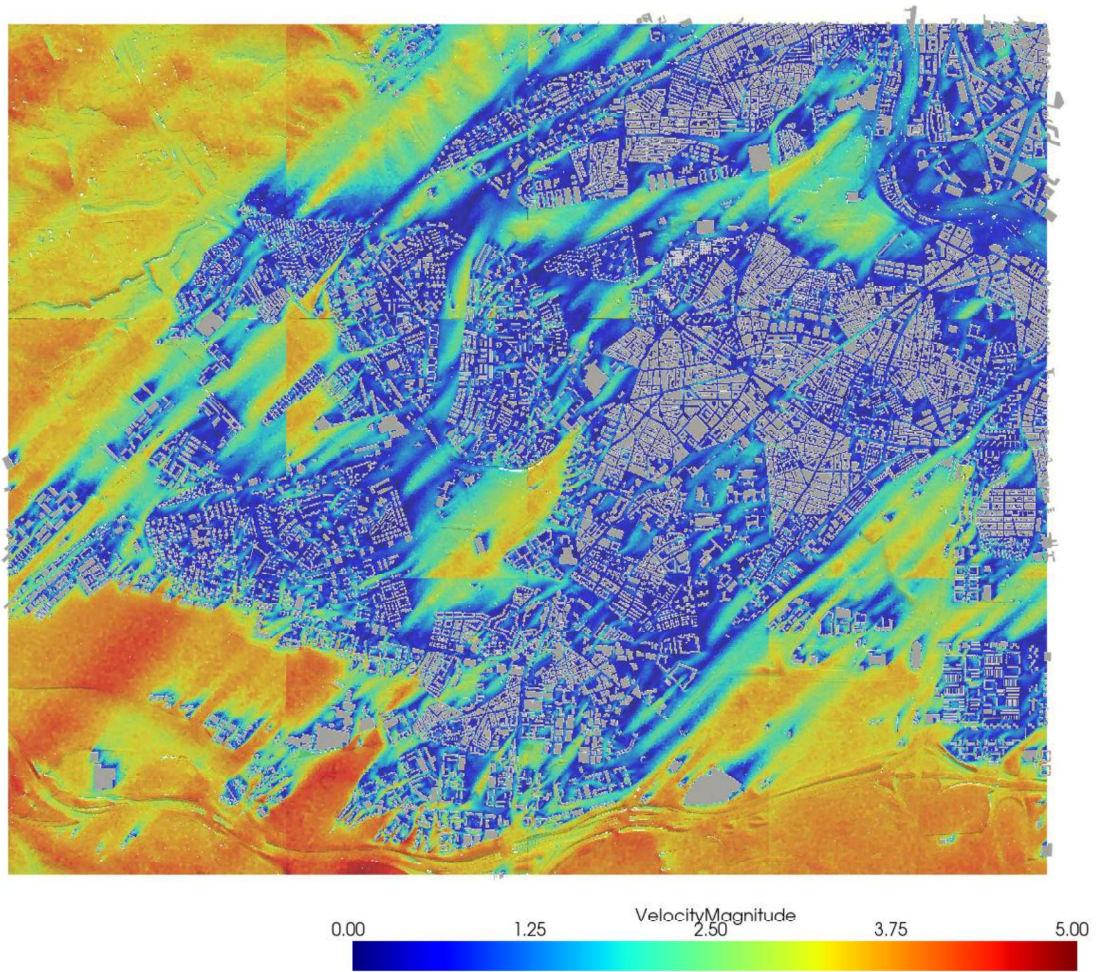


Figura 21: Campo de velocidades a 2 metros de altura para el Caso 2.

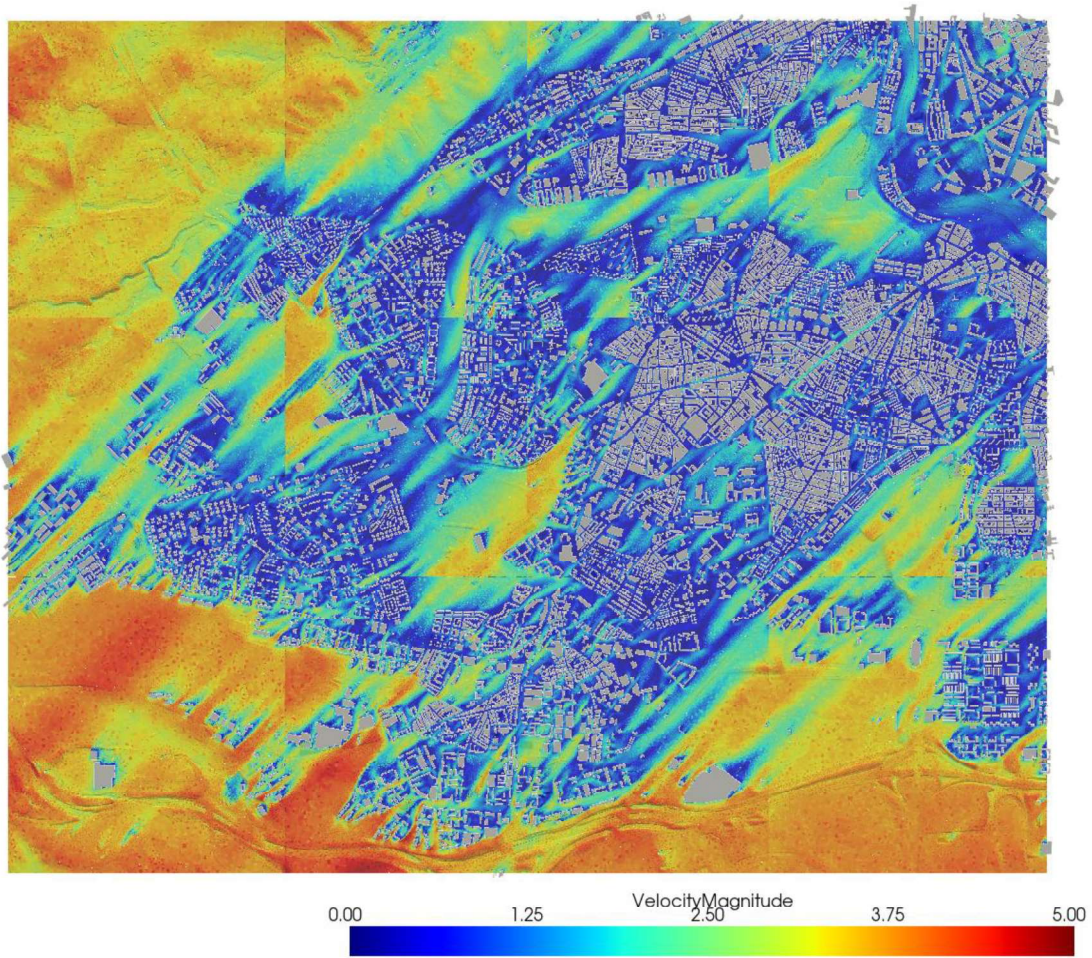


Figura 22: Campo de velocidades a 5 metros de altura para el Caso 2.

3.3.3. Borrasca Elsa

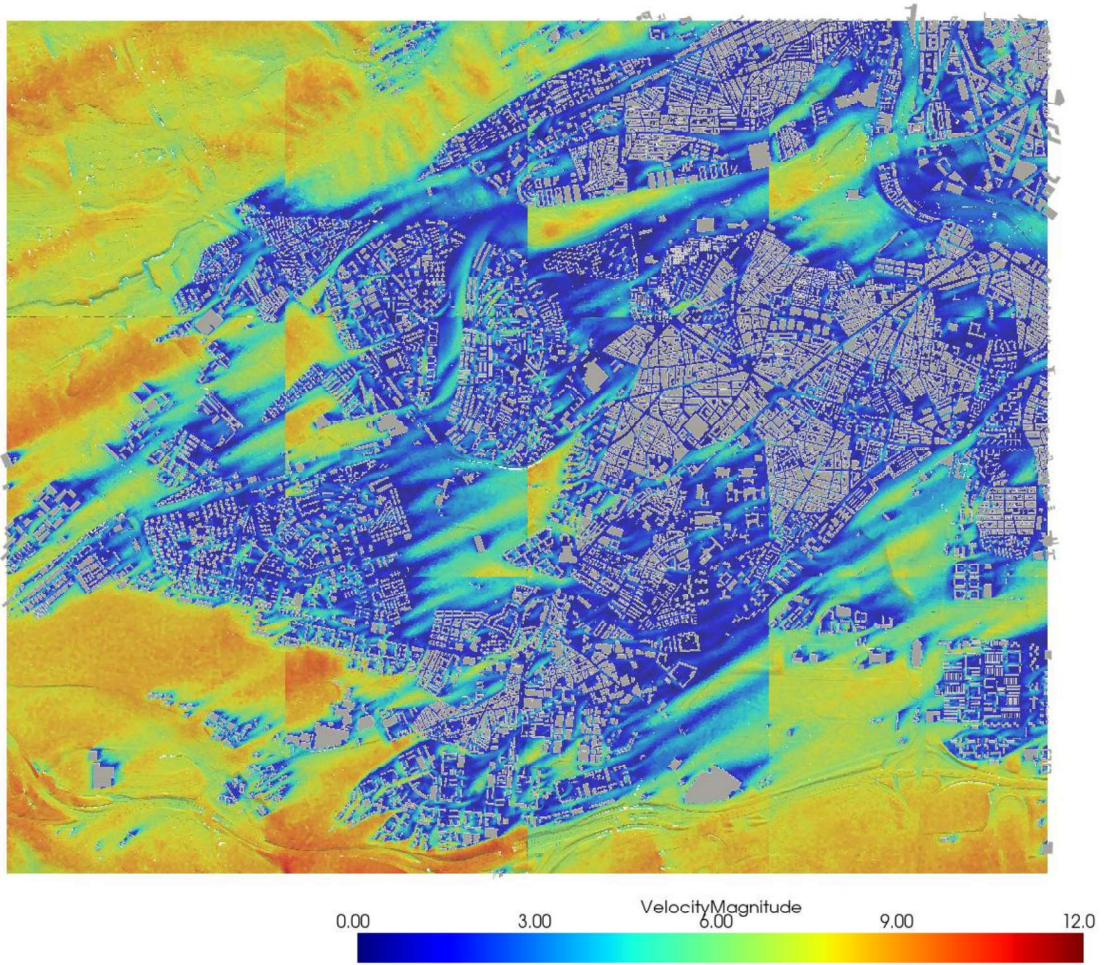


Figura 23: Campo de velocidades a 2 metros de altura para la borrasca Elsa.

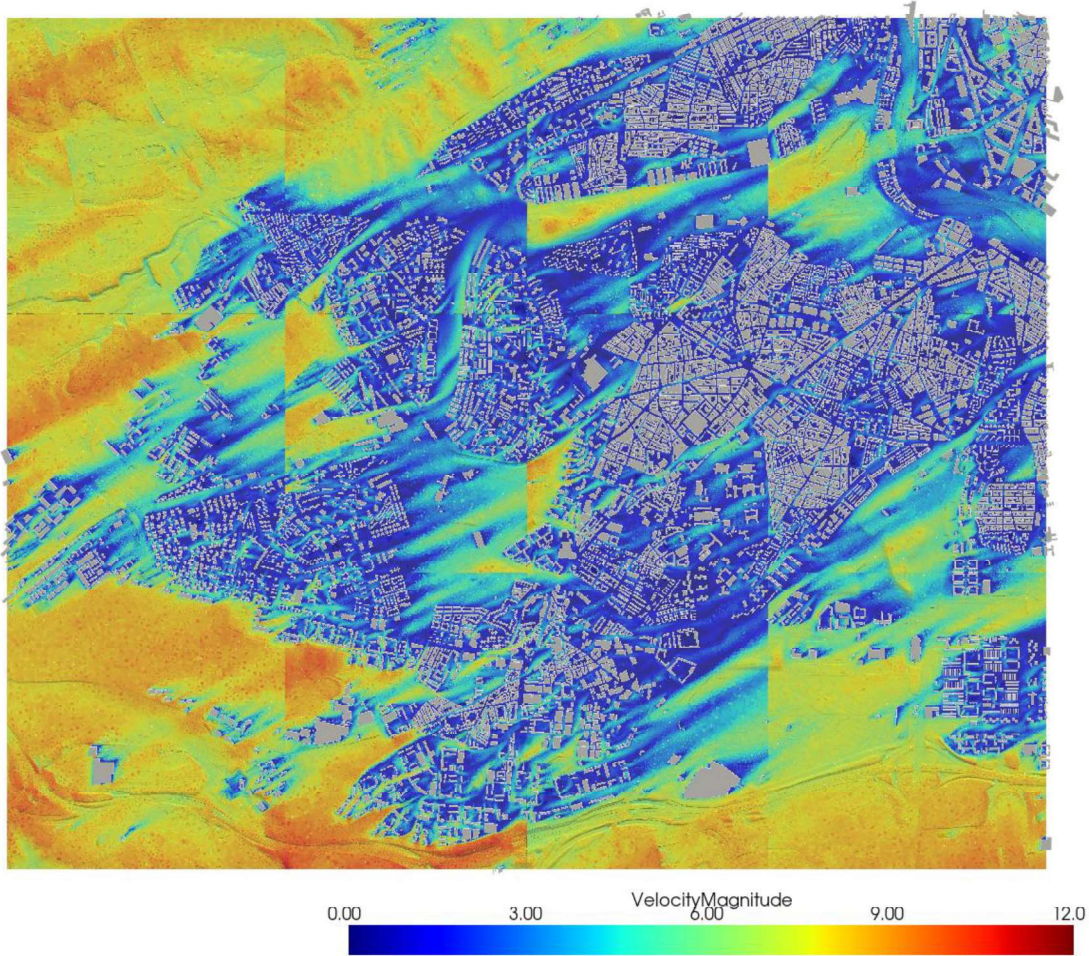


Figura 24: Campo de velocidades a 5 metros de altura para la borrasca Elsa.

3.3.4. Borrasca Herminia

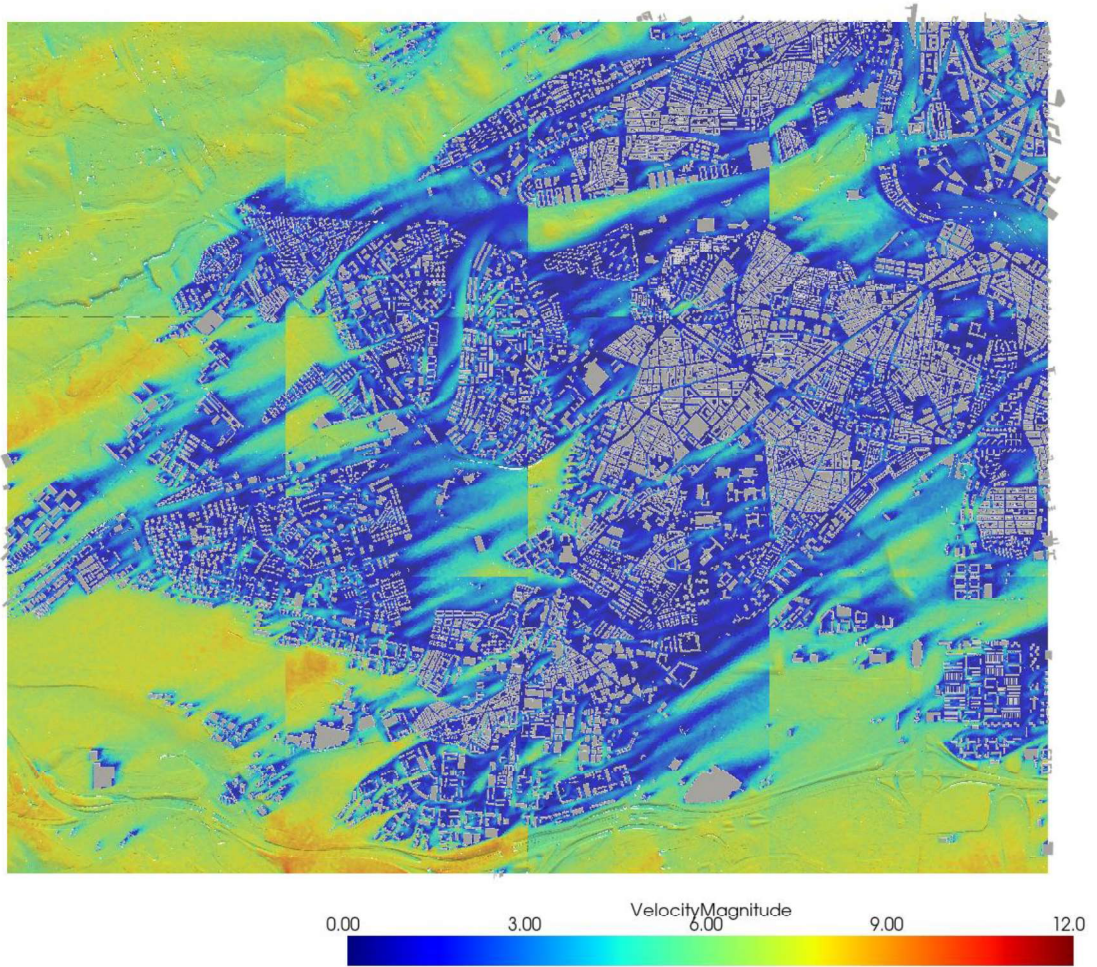


Figura 25: Campo de velocidades a 2 metros de altura para la borrasca Herminia.

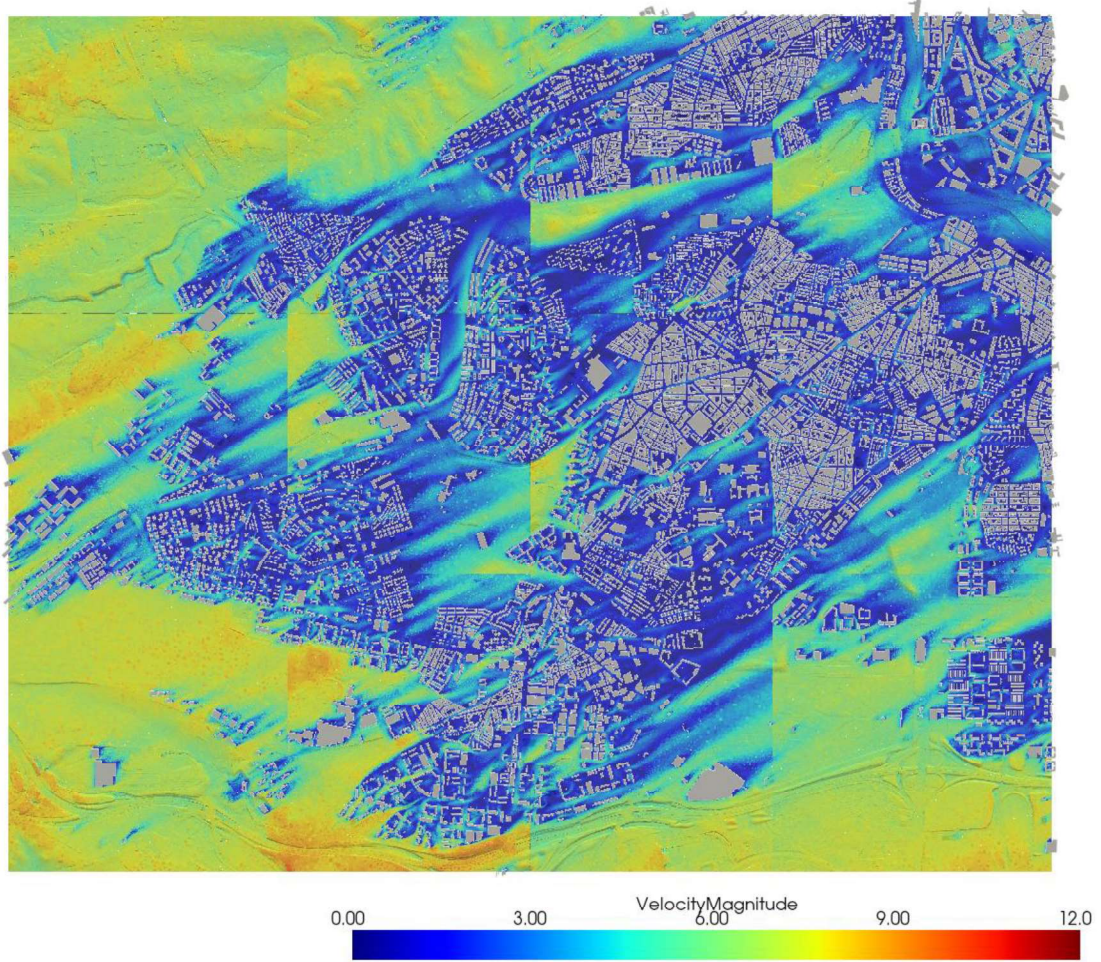


Figura 26: Campo de velocidades a 5 metros de altura para la borrasca Herminia.

3.3.5. DANA

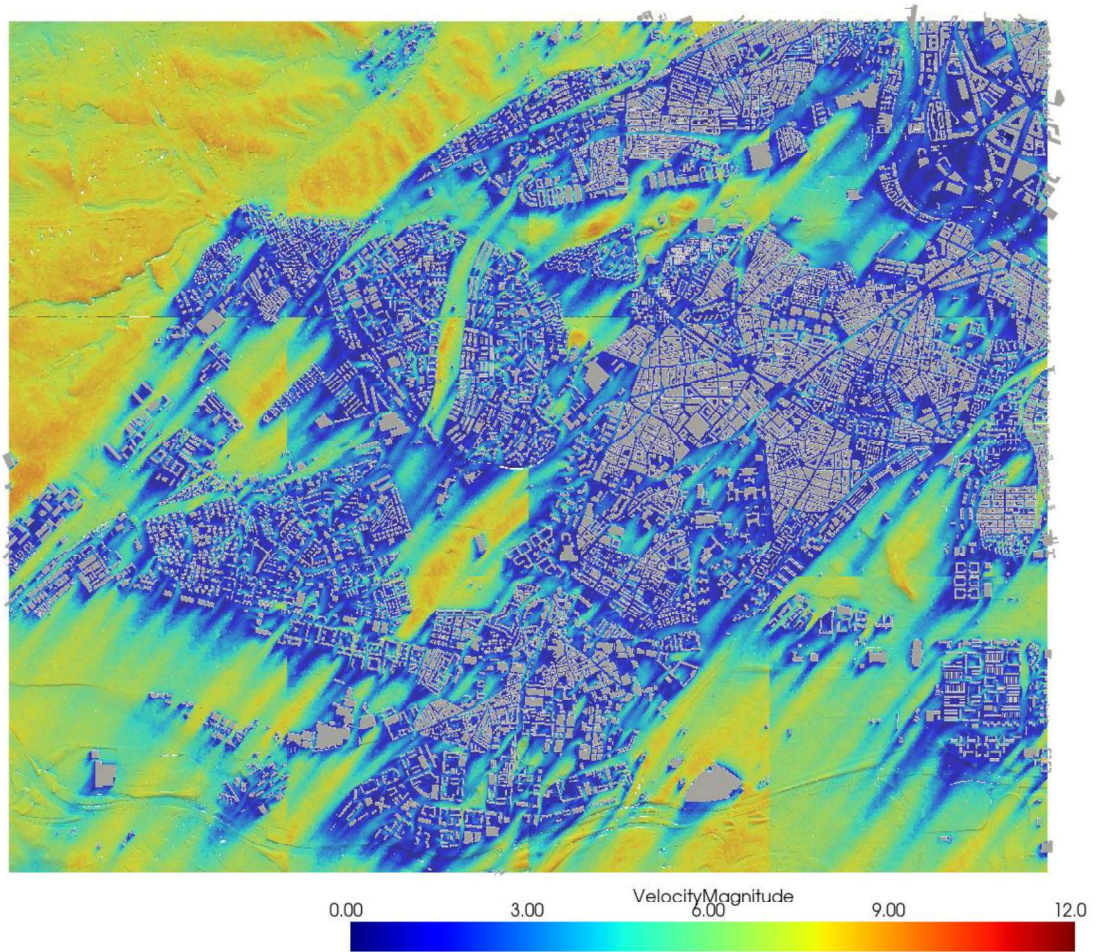


Figura 27: Campo de velocidades a 2 metros de altura para la DANA.

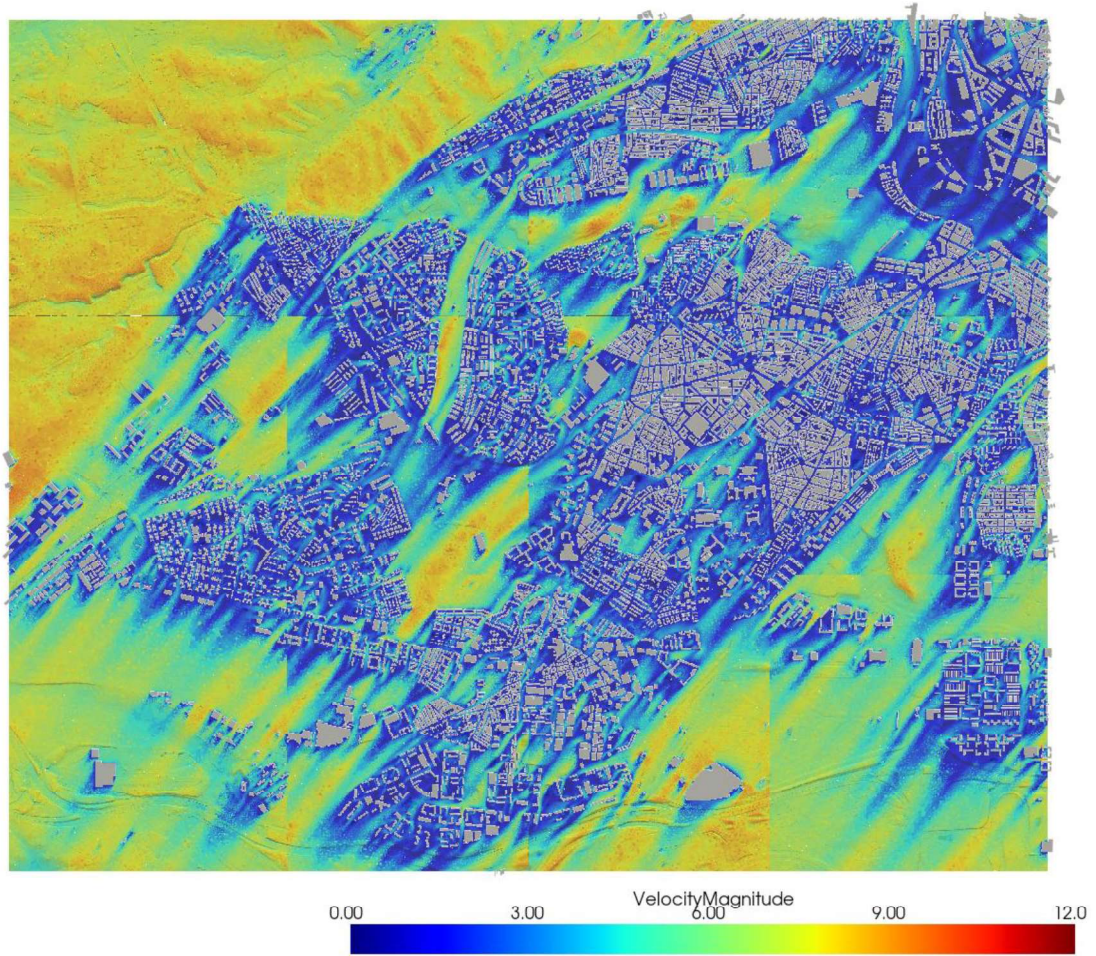


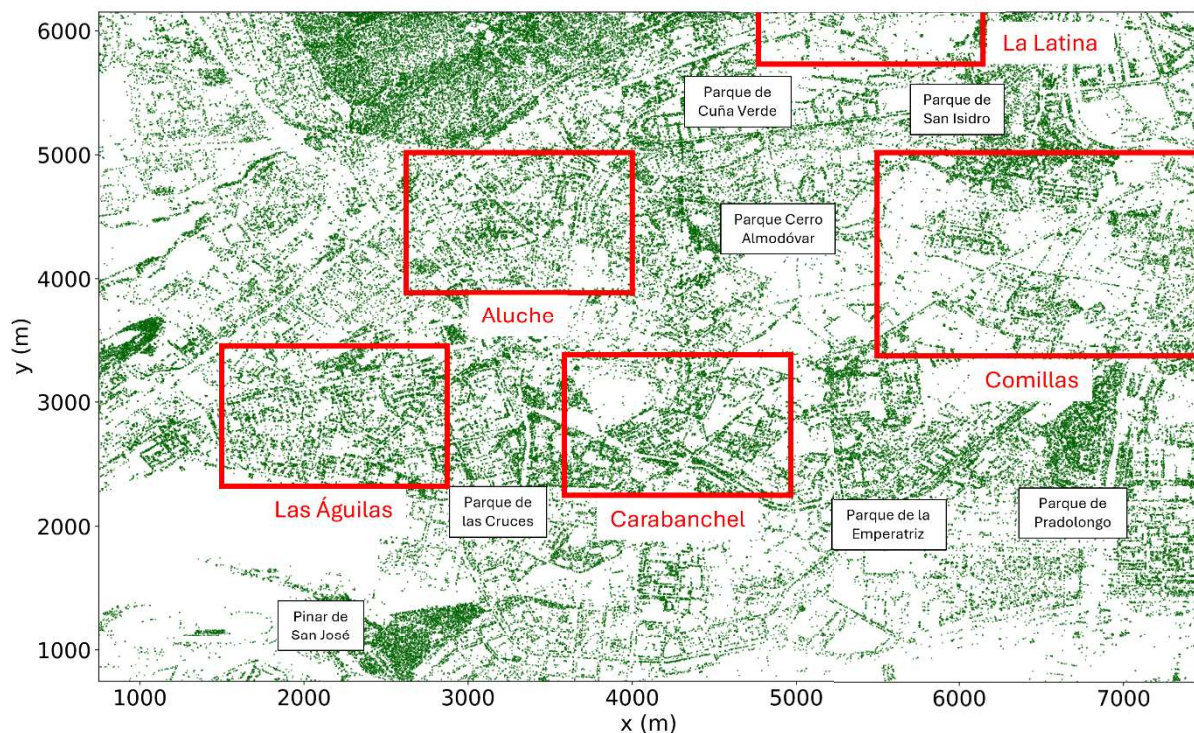
Figura 28: Campo de velocidades a 5 metros de altura para la DANA.

## 4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la presente sección presentamos un análisis pormenorizado de los resultados obtenidos. Dado el gran tamaño del dominio de simulación (unos 42 km<sup>2</sup>), puede resultarnos de utilidad dividir nuestro dominio en ciertas zonas de interés, teniendo en cuenta los distintos barrios de la zona.

### 4.1. ZONAS DE ESTUDIO

Para empezar a analizar los resultados, debemos primero fijar las zonas en las que nos centraremos. En la Figura 28 hemos marcado las zonas de mayor concentración de alta vegetación de la Figura 8, haciendo un análisis de los puntos representados junto con la vista cenital extraída a través de Google Earth. Analizando con cuidado estas dos fuentes, hemos marcado los lugares que, por su localización, pueden ser considerados como interesantes en el caso en el que haya fuertes corrientes de viento. Dado que los parques pueden ser cerrados con relativa facilidad en caso de fuertes rachas de viento, nos centraremos más en el entramado de calles de las distintas zonas.



**Figura 29:** Principales zonas de estudio y su densidad de vegetación.

Los barrios de Las Águilas y Carabanchel pueden ser objeto de estudio debido a su proximidad a una zona despejada, correspondiente con la zona suroeste de nuestro dominio, próxima al Aeropuerto de Madrid-Cuatro Vientos. La apertura de dicha región puede provocar la presencia de rachas de viento que, dependiendo de sus direcciones (nos fijaremos en estos casos, sobre todo, en vientos de componente suroeste) pueden provocar grandes corrientes en algunas calles, que servirán como embudo para la formación de otro tipo de estructuras. En la Figura 29 hemos marcado también los principales parques de la zona. Haremos referencia a ellos durante el análisis de los datos, sobre todo en lo referente a la rachas de viento a las que podrían llegar a estar sometidos, pues estos son los principales focos de cierres y limitaciones bajo condiciones de viento racheado.

Una aspecto que debemos destacar de los resultados generales de las simulaciones (Figuras 19-26) es el hecho de que estas han sido realizadas por partes (ver Figura 4). Por esta razón, los efectos de una determinada parte del dominio pueden no trasladarse correctamente a la simulación contigua, que pierde parte de la información del viento. Actualmente, nosotros trabajamos con un determinado entrelazamiento en las simulaciones, de modo que todas comparten regiones comunes. Esto ayuda a reducir en gran medida este fenómeno, pero puede haber ciertos casos en los que la ausencia de determinadas estructuras en una simulación pueda provocar corrientes mayores que las que se darían en la realidad, provocando algunos cortes que se pueden apreciar a simple vista, sobre todo en regiones en las que no haya una gran presencia de edificios. Es por esta razón por la que tenemos que analizar los resultados como un conjunto, apartando en gran medida el valor cuantitativo de las corrientes y fijándonos en el dominio como un conjunto.

## 4.2. BARRIO DE LAS ÁGUILAS

Vamos a empezar analizando el barrio de Las Águilas, situado en la parte más suroeste de nuestro dominio, justo al norte de una zona abierta como es el Aeropuerto de Madrid-Cuatro Vientos. Esta región es de bastante interés por su situación geográfica, puesto que tiene una zona despejada muy cercana, lo que puede provocar la aparición de grandes rachas de viento

en algunas calles, dependiendo de la dirección del viento. Si el viento viene con componente sur, antes de llegar al barrio se encontrará con la zona despejada del aeropuerto, lo que puede provocar grandes rachas en las principales calles, como la Calle Valle Inclán o la Calle Rafael Finat, con una orientación paralela a los vientos del suroeste.

Para el caso de vientos de componente noreste, en el caso del barrio de Las Águilas tenemos una mayor densidad de edificios en el cuadrante norte, por lo que esperamos una formación de estructuras de viento menos preocupantes, puesto que el viento llegará relativamente frenado, procedente del barrio de Aluche y del centro de la ciudad. En la frontera oriental de este barrio se encuentra el Parque de las Cruces, también bastante abierto. Las conclusiones que extraigamos de este barrio podrán ser aplicadas también a dicho parque. En las Figuras 31-35 podemos encontrar una vista más cercana de cada uno de los casos a estudiar.

#### 4.2.1. Viento noreste (NE)

Empezaremos comparando las Figuras 31 y 32, que se corresponden con el viento de componente noreste. El barrio de Las Águilas (ver Figura 30) está rodeado por los barrios de Aluche y Vista Alegre en esta dirección, aunque existe una cierta separación (Avenida de los Poblados). Como hemos comentado antes, esperamos que se formen menos corrientes preocupantes que en el caso de componente suroeste.

Para una mejor comparación, en todas las figuras de estos barrios hemos fijado la escala entre 0 y 12 m/s, para que se aprecie de mejor forma la diferencia entre ambos casos. En el Caso 1, tenemos una leve corriente entrando por la zona norte de la Calle Rafael Finat (cuadro rojo en la Figura 31), a la altura del cruce con la Calle Valle Inclán. No se aprecian corrientes mucho mayores. En la Avenida de Las Águilas (cuadro verde), a la altura del cruce con la Calle Maribel, hay una pequeña concentración de vegetación alta (según las imágenes de satélite se corresponden con un parque). Debido al ancho de la calle, puede formarse una cierta aceleración de las corrientes del aire. En general, no observamos ninguna problemática, aunque sí que podemos observar mayores velocidades en la zona norte que en la zona sur, como era de esperar dada la cercanía con el Parque Chileno, una zona más abierta.

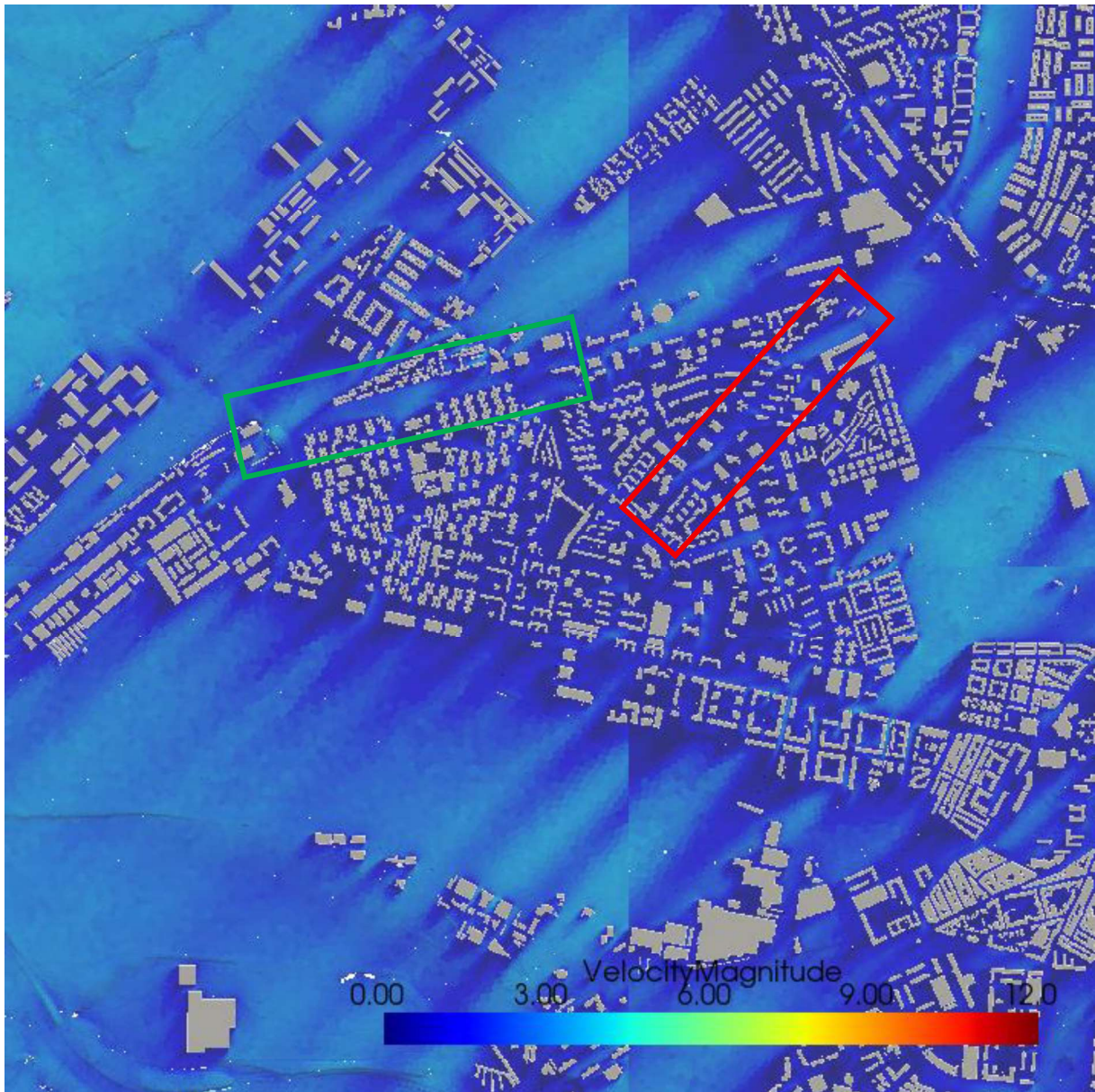


**Figura 30:** Vista cenital del Barrio de Las Águilas.

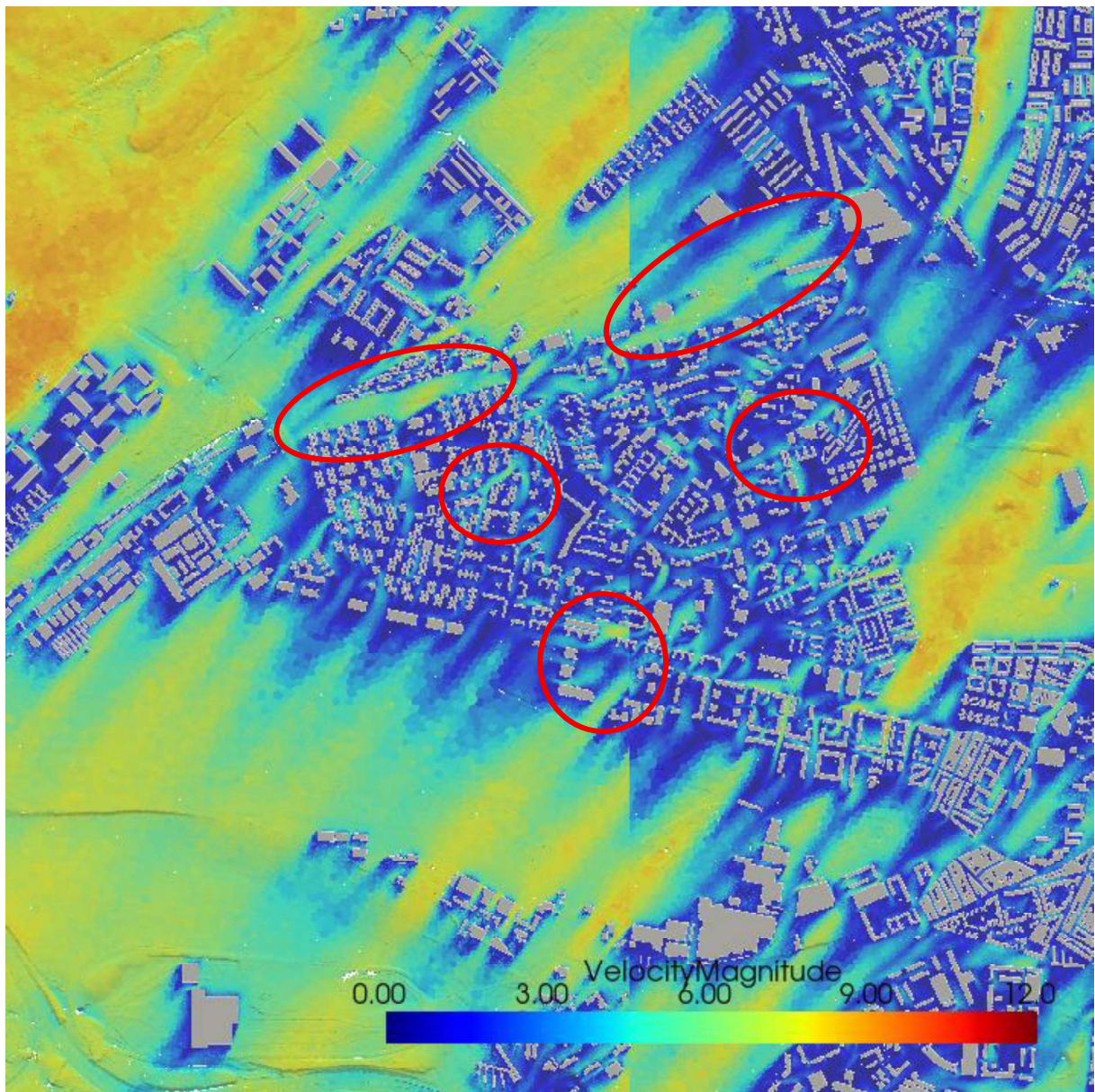
Pasando a analizar el caso de la DANA, podremos observar resultados mucho más interesantes. Vemos que tenemos un gran número de calles en la zona central del barrio con velocidades de hasta 10 m/s. Destacamos, en especial, el cruce de la calle Rafael Finat con la Avenida de la Aviación, la Calle de Oliva de Plasencia a la altura de la Calle Aldeanueva de la Vera o la zona previamente mencionada a en la Avenida de Las Águilas. En la Figura 32 destacamos las zonas de mayor relevancia, con vientos más potentes, dentro de esta zona. Debemos hacer notar, de nuevo, la diferencia de velocidades entre la zona norte y la zona sur, aunque en este caso es menos evidente debido a la formación de algunas estructuras en todo el entramado urbano.

También queremos notar, dentro de la zona norte de la región, el Parque Chileno, cerca del Centro Deportivo Municipal Aluche. En esta zona, vemos unas velocidades relativamente altas, aunque no debemos extraer directamente el dato sin tener en cuenta que esa zona está cerca de una de las separaciones de nuestro dominio computacional. Como habíamos mencionado anteriormente, cada sub-simulación no tiene en cuenta todos los edificios circundantes, lo cual puede provocar velocidades más altas en zonas más despejadas. Este

efecto disminuye enormemente en presencia de muchos edificios, puesto que el aire de las condiciones de frontera llega mucho más frenado. En la Figura 32 hemos destacado los principales puntos de interés, que pueden provocar corrientes de aire intensas en esta primera zona analizada con viento de componente noreste (NE).



**Figura 31:** Barrio de Las Águilas (Caso 1). El cuadro rojo representa la Calle Rafael Finat, en donde se forma una leve corriente en este caso con poco viento. El cuadro verde marca la posición más interesante en la Avenida de Las Águilas, en la zona cercana al Parque Galaxia. Nótese la existencia de mayores valores de velocidad en la zona norte, como era de esperar.



**Figura 32:** Barrio de Las Águilas (DANA). Destacamos la presencia de más puntos de importancia, formándose corrientes de hasta 10 m/s (ó 36 km/h) en numerosos cruces y calles. Se ha marcado en color rojo las principales zonas de corriente, aunque se pueden apreciar bastante distribuidas por todo el mapa.

#### 4.2.2. Viento suroeste (SO)

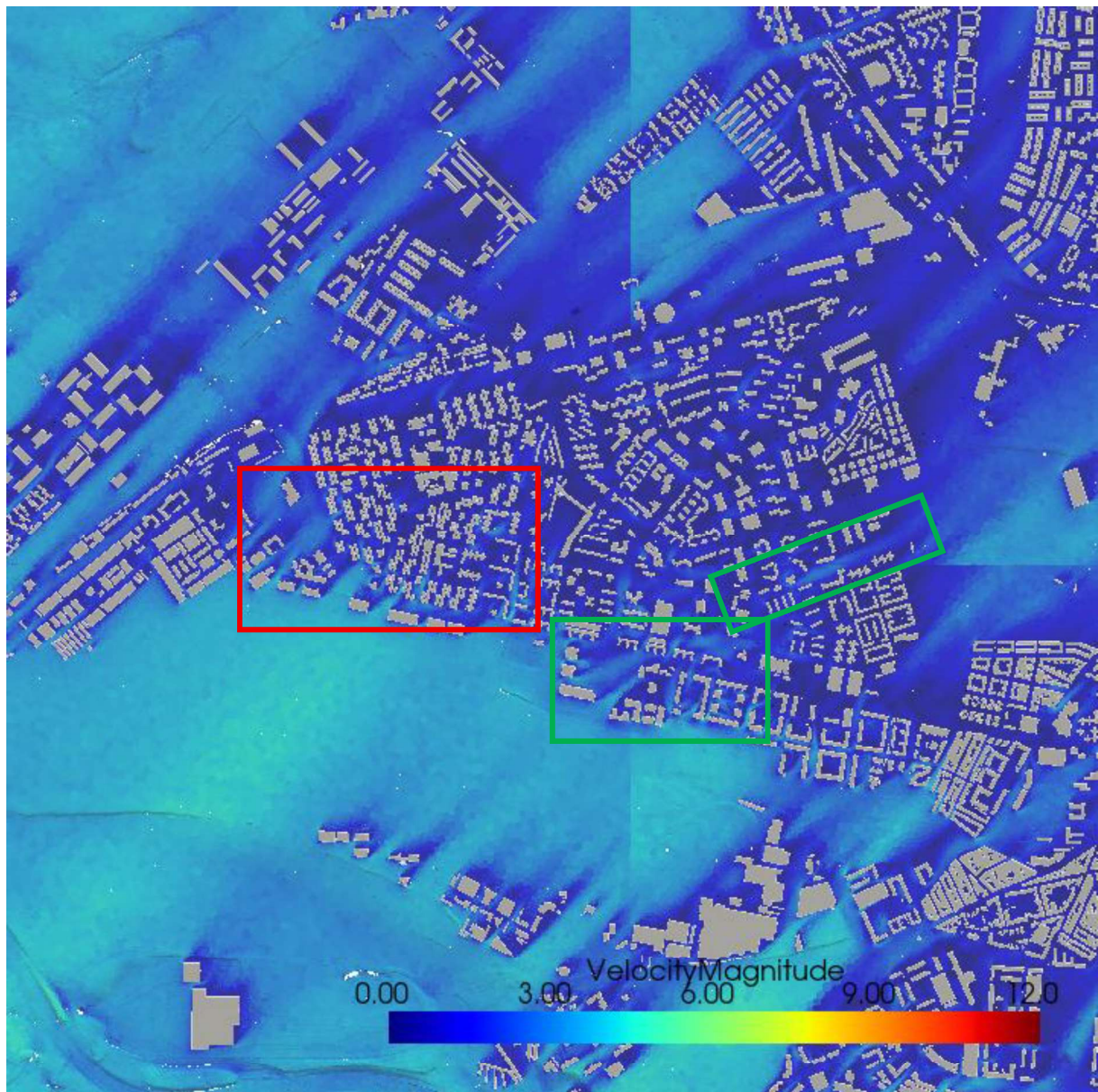
Pasamos ahora a analizar el caso con viento del suroeste. Como hemos explicado anteriormente, esperamos la formación de corrientes debido a la cercanía del barrio al aeropuerto, una zona muy abierta. Además, la región es predominantemente plana, sin que exista ningún tipo de levantamiento en el terreno que pueda frenar las corrientes de aire suroeste.

Antes de continuar, es importante hacer una aclaración respecto a las simulaciones. Para los casos extremos con viento de suroeste, hemos considerado tanto la borrasca Herminia como la borrasca Elsa. La mayor diferencia entre ambas es la velocidad del viento (8,03 m/s para Elsa vs 7,06 m/s para Herminia). Puesto que la dirección del viento es prácticamente la misma, nos vamos a referir indistintamente a cualquiera de las dos, y solo marcaremos las zonas importantes en la Figura correspondiente a la borrasca Elsa.

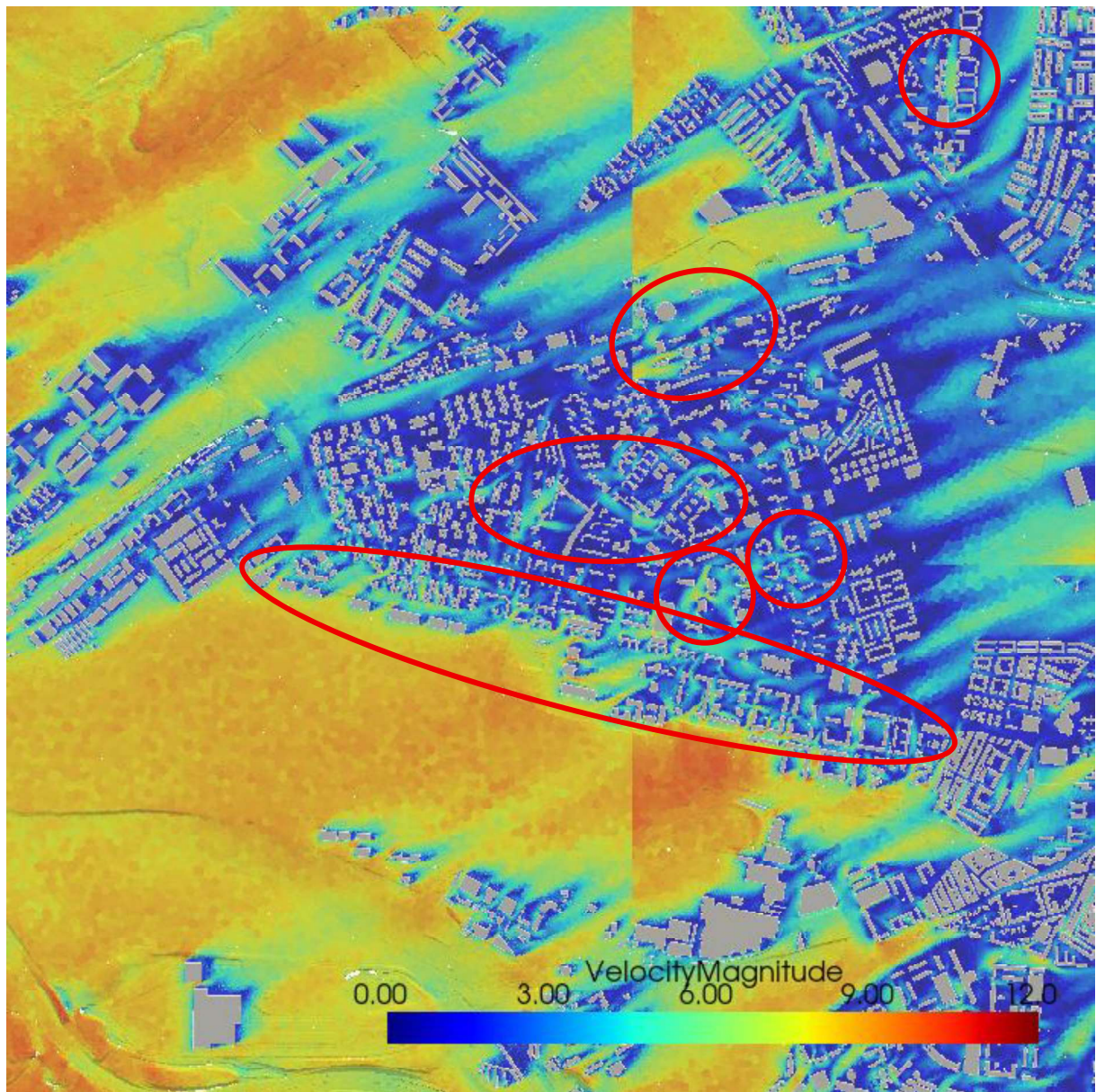
Analizando la Figura 33, podemos ver, en comparación a la Figura 31, una mayor velocidad en la zona sur, dejando la región de la Avenida de Las Águilas, al norte del barrio, con velocidades mucho menores que para el caso del viento con componente noreste. Vemos, sin embargo, que en la zona del aeropuerto llegamos a valores mucho mayores, como era de esperar. En esta Figura observamos pocas corrientes formadas, salvo alguna en la zona más occidental (recuadro rojo) y alguna otra en la zona más oriental (recuadro verde). Obviamente, la Avenida de la Aviación, dado que atraviesa el barrio por toda su parte sur, podrá sufrir mayores rachas de viento, que se pueden transmitir a alguna de las calles que la crucen.

Para las Figuras 34 y 35, que se corresponden a una borrasca con cierta inestabilidad atmosférica, vemos que se produce una intensificación importante de las corrientes que se producen. De la misma forma que para el caso de los vientos de componente norte, aparecen en el barrio numerosas zonas con grandes circulaciones, aunque sí que es cierto que no se cumple una predicción que habíamos hecho anteriormente. La orientación de las calles Valle Inclán, Aldeanueva de la Vera y Rafael Finat podrían hacernos pensar que el viento podría colarse por ellas y soplar con gran intensidad. Sin embargo, gracias a la componente oeste del viento suroeste y la orientación de la zona sur de estas calles, que giran a la altura de la Calle Soledad Cazorla, tenemos menor velocidad de la esperada. Obviamente, en casos residuales

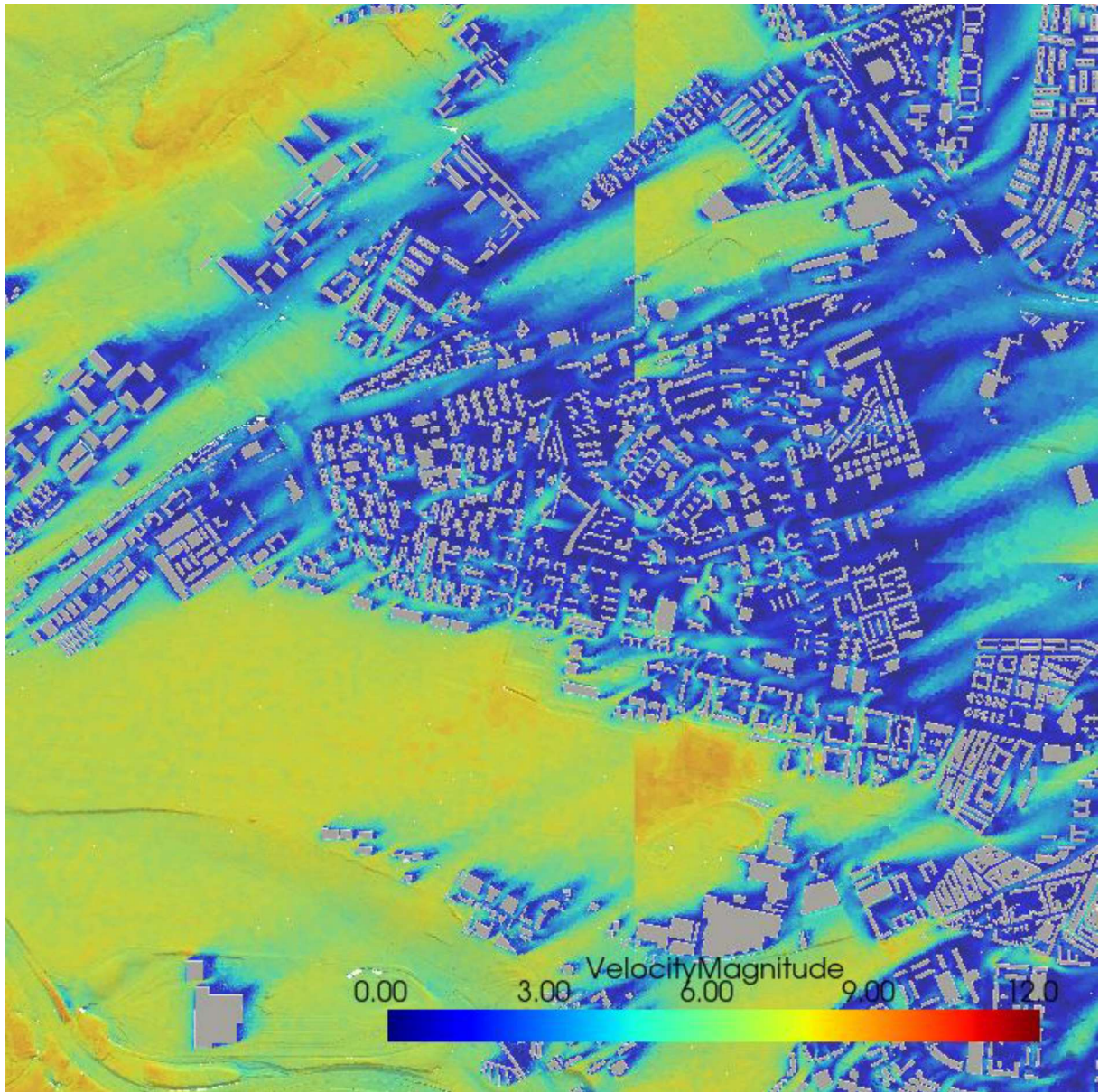
en los que el viento sople más orientado hacia el sur, podría darse una situación de mayores rachas en estas calles. En general, observamos una aceleración del viento en la mayoría de las zonas, aunque como ya hemos comentado, esta se da sobre todo en la zona sur, la más cercana al aeropuerto. En la Figura 34 hemos marcado algunas de estas zonas.



**Figura 33:** Barrio de Las Águilas (Caso 2). Se destacan con cuadros de colores las zonas con formación de alguna corriente de mayor intensidad, aunque en este caso tenemos unos vientos bastante moderados. Nótese los mayores valores alcanzados en la zona sur, en contraposición con el caso anterior.



**Figura 34:** Barrio de Las Águilas (Elsa). Como se puede observar, existen corrientes bastante intensas en muchas de las calles del barrio.



**Figura 35:** Barrio de Las Águilas (Herminia). En este caso, tenemos una situación muy similar a la de la borrasca Elsa, pero con vientos de menor intensidad.

### 4.3. BARRIO DE ALUCHE

Vamos a considerar ahora la segunda de las regiones destacadas en la Figura 29. El Barrio de Aluche está situado al noroeste de Las Águilas. Para el anterior caso habíamos predicho que los vientos de componente noreste llegarían con menor fuerza que los vientos del suroeste debido a la presencia de edificaciones rodeando por el noreste. Pues es precisamente el Barrio de Aluche uno de los que bloquea los vientos que llegan a Las Águilas por el noreste.

Para este barrio, tenemos edificaciones cerca para ambas direcciones de viento consideradas, por lo que en este caso no vamos a hacer distinción entre el norte y el sur de la región. De hecho, la mayor particularidad de este barrio es la presencia de un parque (el Parque de Aluche) que cruza de norte a sur, dividiéndolo en dos partes bien diferenciadas, una a cada lado.

Echando un vistazo de las calles del barrio en vista cenital, apreciamos una orientación de las calles bastante poco regular, lo cual facilita que no se formen grandes corrientes, puesto que no hay grandes calles en el sentido de circulación del aire.

El Barrio de Aluche tiene también el Parque Chileno al oeste, y el Parque Cerro Almodóvar al este, que lo conecta con San Isidro y Carabanchel. Vamos a analizar ahora los distintos resultados para cada una de las dos direcciones de viento. La Figura 36 muestra una vista cenital del barrio.

#### 4.3.1. Viento noreste (NE)

Como hemos dicho, observando la orientación del barrio en Google Maps, podemos apreciar que la forma de las calles es muy irregular, y no existen unas entradas muy claras para el aire, con orientación noreste o suroeste. Si bien es cierto que la Calle de Valmojado, que cruza el barrio de norte a sur paralelamente al Parque de Aluche, puede servir como entrada para el aire, su orientación no es perfecta para ello. De hecho, por lo visto en el anterior caso en el que las principales calles tenían un pequeño giro que evitaba la entrada de aire completamente paralelo, en este caso esperamos un comportamiento similar. Las calles más expuestas, en la periferia del barrio o cerca del parque, podrían sufrir ciertos vientos

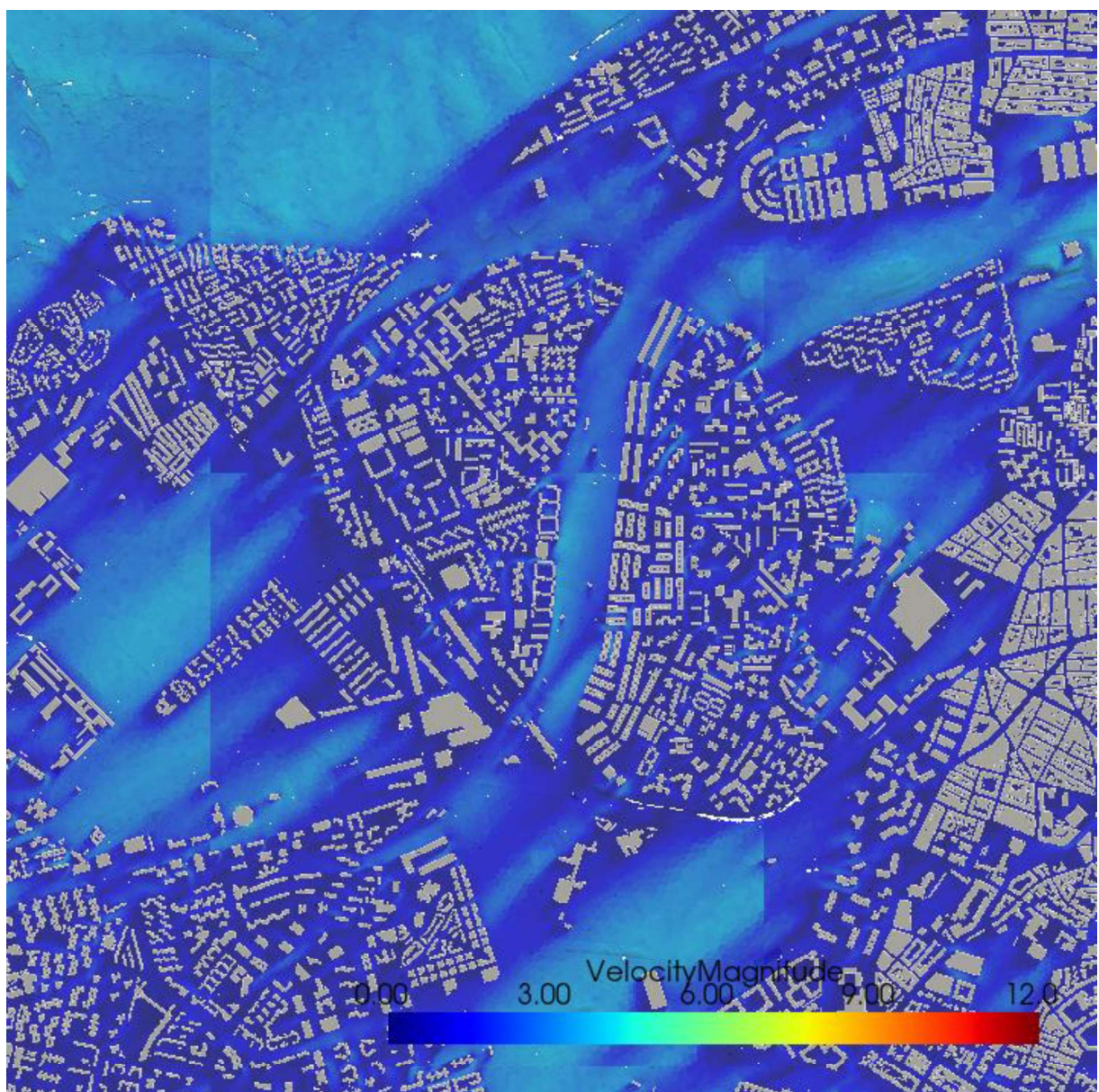


**Figura 36:** Vista cenital del Barrio de Aluche.

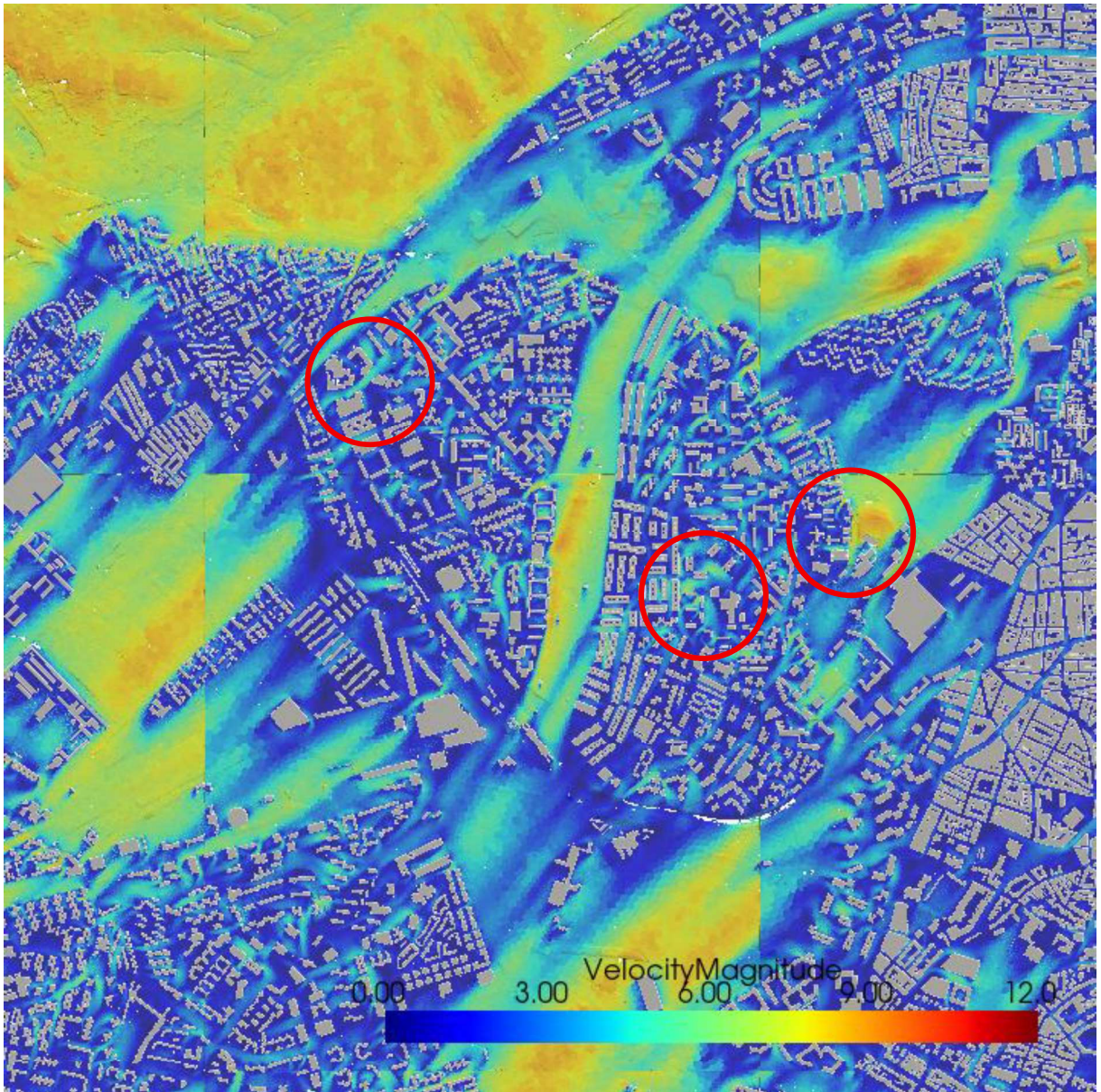
racheados, pero en este caso esperamos que las calles más rodeadas no tengan tanto problema. En la Figura 36 podemos ver una vista aérea del lugar, mientras que en la Figura 37 presentamos la simulación para el Caso 1. Como podemos observar, las áreas más afectadas por el viento son las que están fuera del entramado urbano del Barrio de Aluche. El Parque Chileno (oeste), el Parque Cerro Almodóvar (este), el Parque de la Cuña Verde de Latina (noreste) y la parte sur de la Casa de Campo (noroeste) son los que presentan las mayores velocidades de viento, junto con el Parque de Aluche, que cruza el barrio de norte a sur y que en algunas zonas presenta algunos vientos que se inmiscuyen entre las calles del centro del barrio. En este caso, debido a que la zona está mucho más cerrada por el noreste y tampoco tenemos calles orientadas en esa dirección, no observamos grandes rachas de viento.

Lo mismo sucede para la simulación de la DANA (Figura 38), aunque para este caso sí que empezamos a ver alguna velocidad mayor entre las calles, que hemos marcado en rojo en la Figura. Muchas de las calles alcanzan valores de 5-6 m/s (18-22 km/h) a 2 metros de altura, que son en general algo menores que los que veíamos en el caso del Barrio de Las Águilas. Como hemos dicho, el viento de componente noreste (NE), no produce estructuras muy preocupantes en las zonas de mayor vegetación dentro de las calles. Para el caso de los

parques, tanto el de Aluche como los múltiples que existe en la periferia, sí que podemos observar velocidades algo mayores debido a su exposición a rachas de viento intensas, por lo que deberían ser el primer motivo de preocupación a la hora de tomar medidas ante predicciones de vientos racheados. En virtud de lo visto en la Figura 29, el barrio de Aluche no se caracteriza por una densidad muy alta de vegetación y, en general, se observan menos árboles que en otros barrios.



**Figura 37:** Barrio de Aluche Águilas (Caso 1). Las zonas más afectadas son los diferentes parques que rodean al barrio, pero no observamos prácticamente ninguna estructura preocupante en las calles del centro del barrio.



**Figura 38:** Barrio de Aluche (DANA). Para este caso sí que empezamos a observar algunos valores destacables en el centro del barrio, además de los ya mencionados en los parques circundantes.

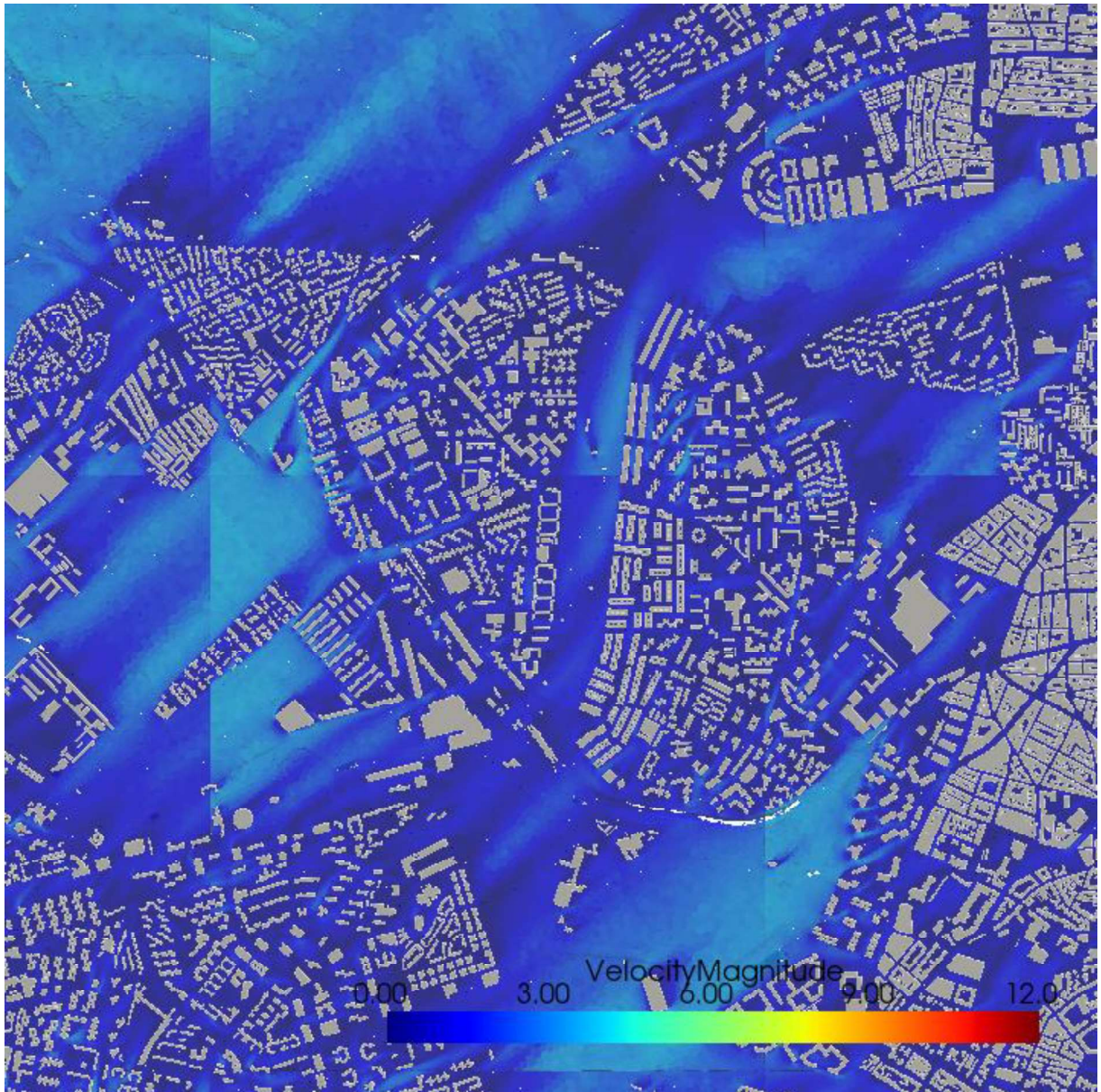
#### 4.3.2. Viento suroeste (SO)

Para este caso de viento suroeste, de igual manera que para el caso del Barrio de Las Águilas, tenemos la simulación del Caso 2 (caso estadísticamente más representativo con viento del suroeste) y de las borrascas Elsa y Herminia. Para referirnos a la “peor situación” en contraposición con el Caso 2, nos referiremos indistintamente a ambas borrascas, puesto que tienen condiciones muy parecidas.

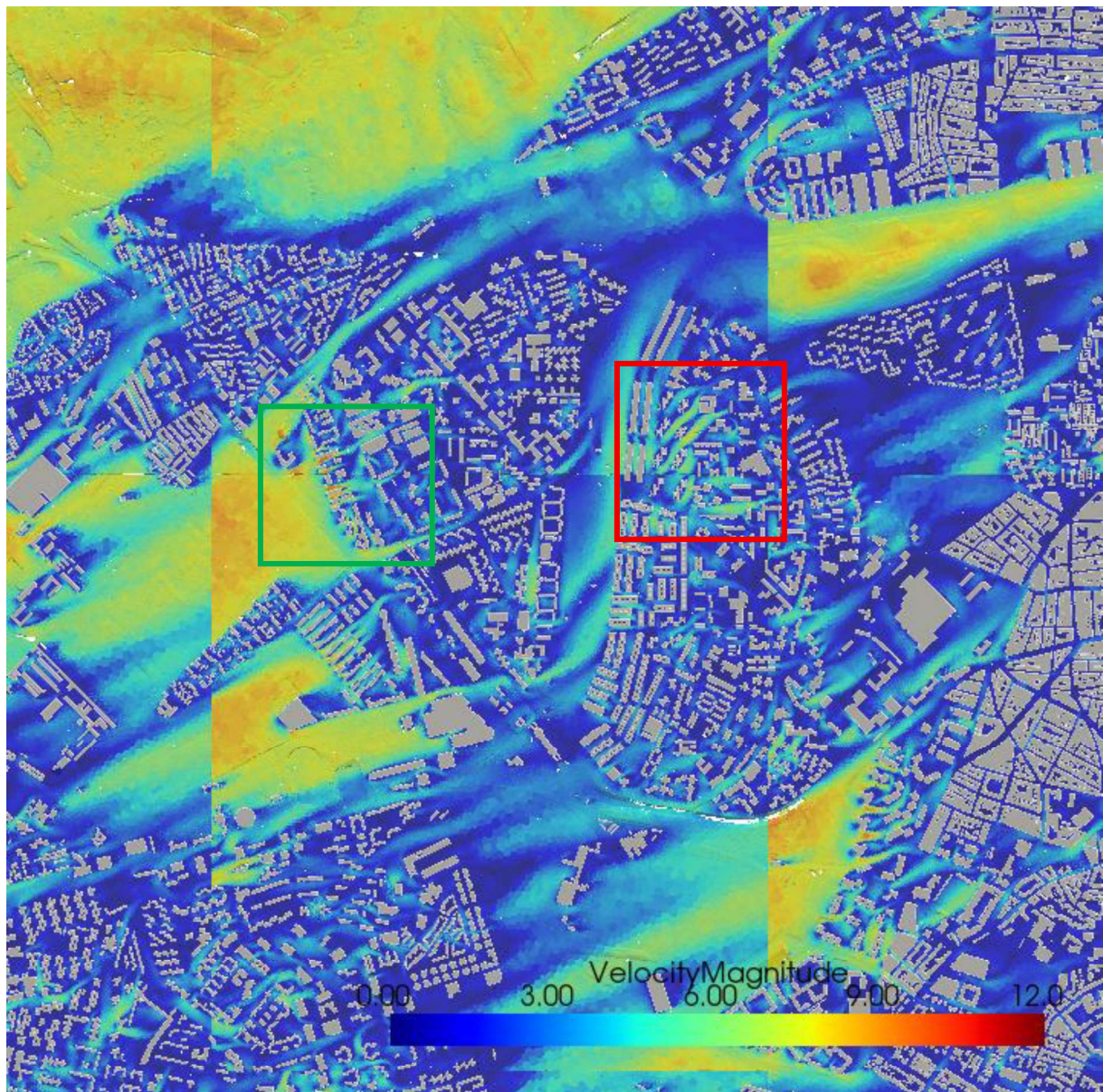
La simulación para el Caso 2 puede observarse en la Figura 39. De forma muy similar al caso del viento de noreste, en este caso tenemos también valores de viento algo más altos en los parques cercanos al barrio, pero valores mucho menores entre las calles.

Para el caso de las borrascas Elsa y Herminia sucede algo parecido al caso del Barrio de Las Águilas. Se produce la aparición de ciertas rachas en algunas calles. Es de especial mención la zona marcada en rojo en la Figura 40, que se corresponde con la Calle de Camarena, en la que hay una urbanización con bastantes árboles según lo que se puede ver en la Figura 29 y la vista aérea de Google Maps. Otra zona interesante es la Avenida del Padre Piquer, marcada en verde en la Figura 40, que produce unas rachas de viento muy intensas, de más de 50 km/h a 2 metros de altura. Se trata también de una zona con bastante árboles, por lo que es de especial interés al estar tan expuesta a los vientos del suroeste (está situada muy cerca del Parque Chileno, lo que provoca que el aire llegue a gran velocidad).

En general, tenemos una situación bastante parecida al caso de la sección 4.2 (Barrio de Las Águilas), en la que el cotejo visual de las Figuras 39, 40 y 41 puede ser de gran utilidad para la prevención de riesgos relacionados con el arbolado en estas zonas.



**Figura 39:** Barrio de Aluche (Caso 2). Observamos también valores de viento algo más altos en los parques cercanos, mientras que en las calles del centro del barrio existen menores valores de viento.



**Figura 40:** Barrio de Aluche (borrasca Elsa). Los valores de viento en los parques cercanos son bastante altos, superando los 40 km/h. Se forman algunas corrientes en las calles que tienen caminos orientados en dirección suroeste, de la misma forma que para el caso de la DANA con viento noreste.

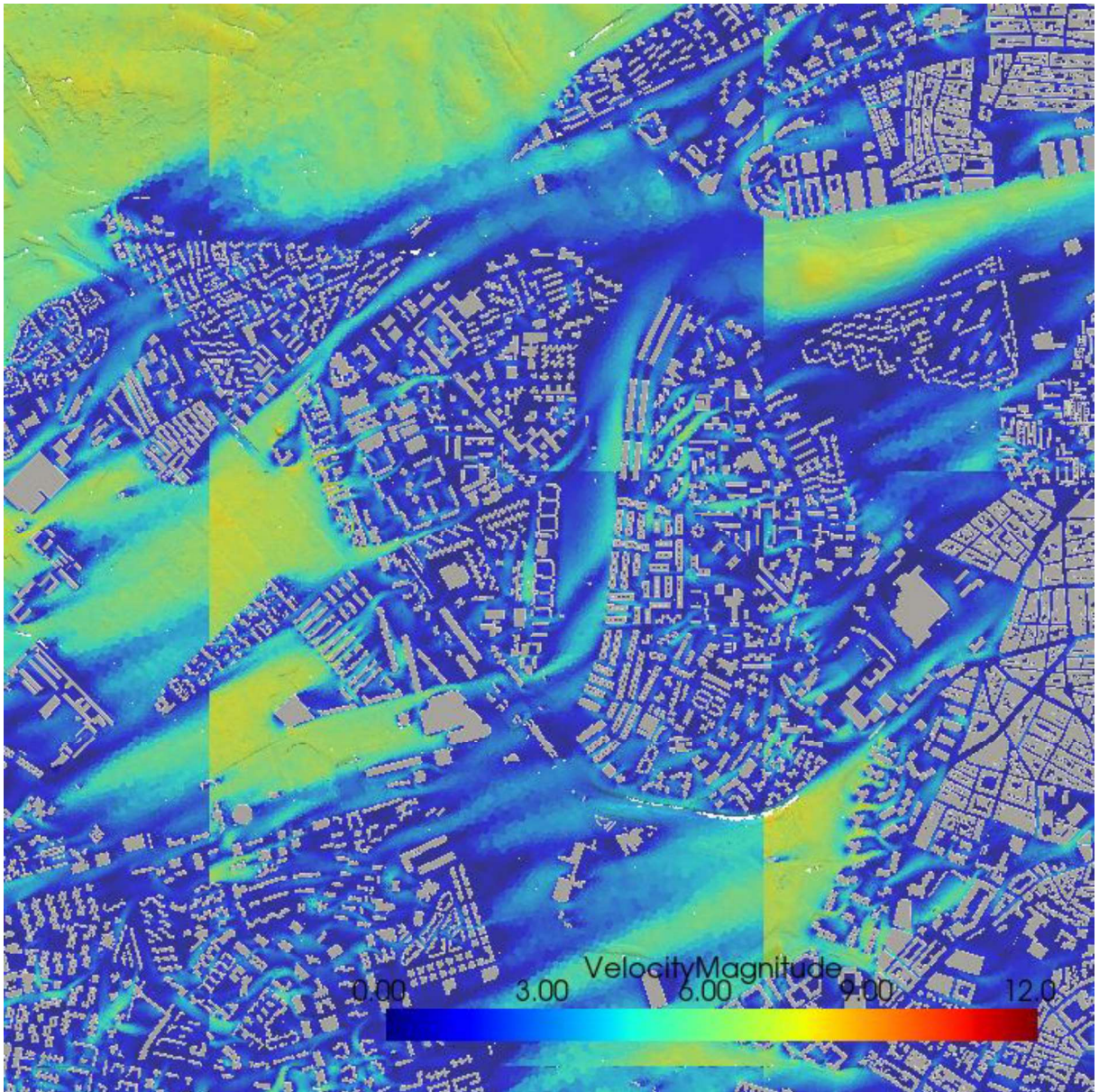


Figura 41: Barrio de Aluche (borrasca Herminia).

#### 4.4. BARRIOS DE CARABANCHEL

Este tercer caso se corresponde con la zona situada al este de los Barrios de Las Águilas y Aluche, centrado en la zona del Distrito de Carabanchel.

De la misma forma que en el anterior caso, los barrios de Carabanchel están rodeados por numerosos parques como el Parque de las Cruces (oeste) o el Parque de la Emperatriz María de Austria (este).

Para el anterior caso, habíamos comentado que la distribución de las calles a ambos lados del Parque de Aluche era bastante irregular, por lo que era más complicado que se formasen grandes rachas de viento a lo largo de una determinada calle. En este caso, podemos observar en la Figura 42 que existen varias calles con orientación NE-SO (Calle Eugenia de Montijo, Calle de Alba de Tormes, Calle del General Ricardos...). En teoría, esto debería propiciar la aparición de corrientes bastante intensas en los casos de las simulaciones de condiciones meteorológicas adversas. En la Figura 42 se puede encontrar una imagen cenital de la zona, extraída de Google Maps.



Figura 42: Vista cenital del Barrio de Carabanchel.

Además de los parques que hemos comentado anteriormente, existen algunas otras zonas de interés con bastante acumulación de arbolado, que comentaremos próximamente.

#### 4.4.1. Viento noreste (NE)

Como se puede ver en la Figura 43, en el Caso 1 se forman algunas leves corrientes con viento de noreste. Como habíamos comentado, existen algunas calles con una orientación que puede llegar a propiciar la aparición de estas corrientes.

Destacamos, sobre todo, el caso de la calle del General Ricardos y la zona norte de los Jardines de Vista Alegre (marcados en rojo), la zona del Hospital Central de La Defensa Gómez Ulla (verde) o el Parque Carabanchel (amarillo).

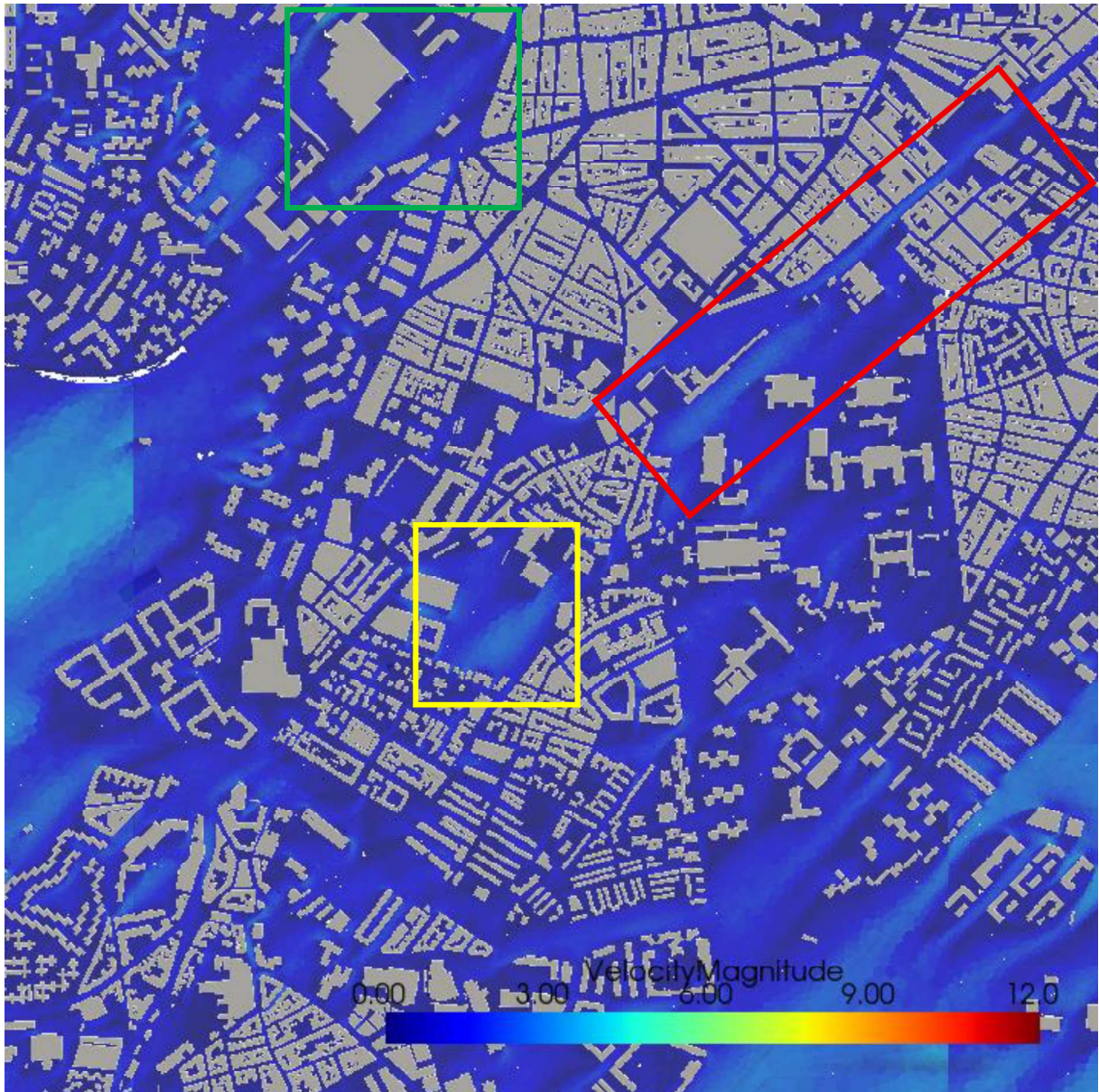
Para una mejor visualización de estas corrientes, pasamos a analizar un caso más límite, como es el de la DANA, que se corresponde también con un viento del noreste. Este caso puede ser visualizado en la Figura 44. El mero cotejo visual de dicha Figura ya confirma lo comentado anteriormente para el Caso 1, pero además resalta otras calles que podrían llegar a ser conflictivas.

Por destacar algunas, que marcaremos en la Figura 44, destacamos sobre todo algunas calles con orientación NE-SO: el cruce de la Calle Guabairo con el Camino de los Ingenieros, cerca de la estación de Metro de Carabanchel, la Calle del General Ricardos, y sus desvíos a la zona norte de la Finca de Vista Alegre (junto a la Residencia de mayores) o la zona de edificios frente al Parque Ingenieros, al lado oeste de la Avenida de Nuestra Señora de Fátima.

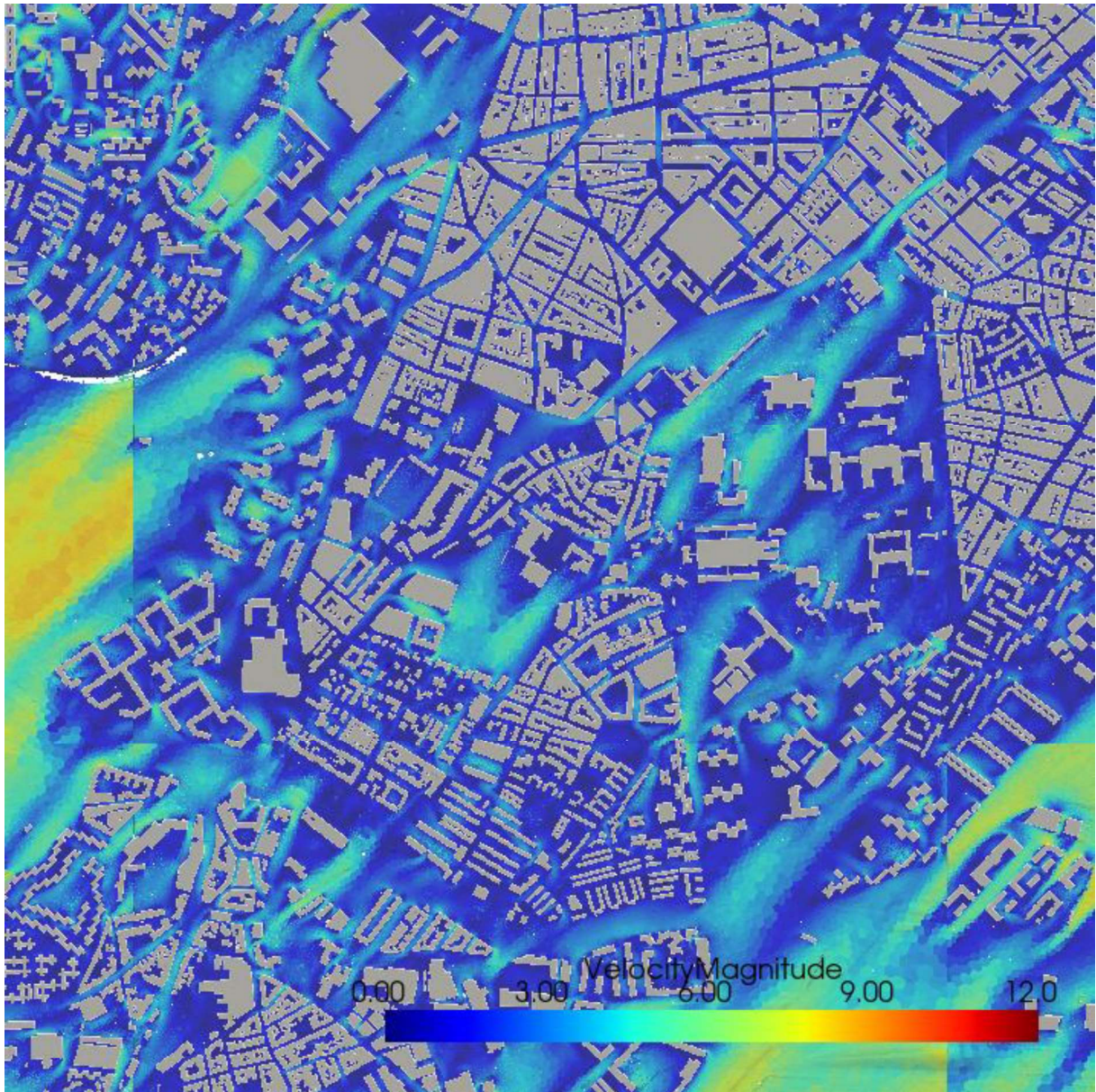
También destacamos otras zonas como puede ser la Calle de Nuestra Señora de la Luz (junto a la Academia Central de la Defensa), el Parque Carabanchel, la zona cercana al Parque de la Emperatriz María de Austria o los Jardines del Fenollar, cruzados por la Avenida de los Poblados y con una gran densidad de árboles según la Figura 29 y la vista aérea de Google Maps.

En resumen, para este caso encontramos una serie de lugares conflictivos, muchos de ellos con parques o grandes agrupaciones de árboles, que deben ser monitoreados de cerca bajo este tipo de condiciones de vientos del noreste.

Como en los anteriores casos, el cotejo visual de las Figuras 43 y 44 proporciona mucha información, por lo que se recomienda adaptar las medidas a lo que se muestra en ellas.



**Figura 43:** Barrios de Carabanchel (Caso 1). Marcamos los casos más claros de rachas de viento.



**Figura 44:** Barrios de Carabanchel (DANA). Se puede observar la formación de numerosas rachas de viento a lo largo de las calles, sobre todo en aquellas con cierta orientación NE-SO.

#### 4.4.2. Viento suroeste (SO)

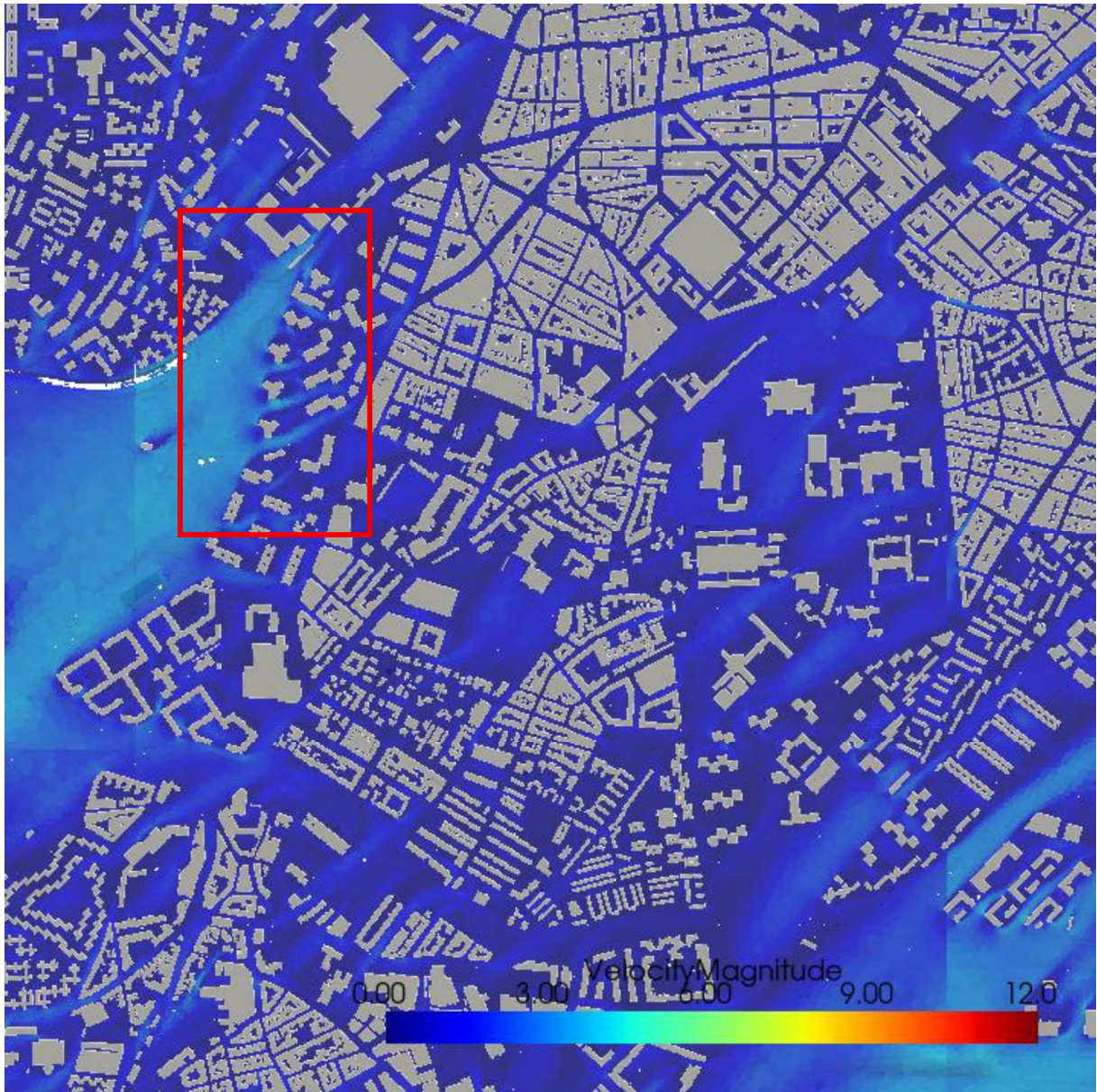
La situación en el caso del viento de suroeste es relativamente similar a la del viento del noreste. En este tipo de situaciones con borrasca, vemos algunas otras calles en las que se forman vientos racheados. Podemos ver el caso más representativo (Caso 2) en la Figura 45. Es de especial mención la parte oeste cercana al Parque Ingenieros y el Cementerio de Carabanchel Bajo, cerca del cruce con la Calle de Fernando Delgado y la Avenida de Nuestra Señora de Fátima. Esa zona está marcada en rojo en la Figura 45.

De nuevo, igual que en el caso del viento de noreste, la Avenida de Nuestra Señora de Fátima es una de las más afectadas, y esto queda más claro aún en las Figuras 46 y 47. La zona mencionada anteriormente reproduce vientos de aún mayor intensidad, llegando como en otros casos a más de 40 km/h. Recordemos que estos resultados son a 2 metros de altura, y estamos hablando de simulaciones con condiciones moderadas dentro de las situaciones de inestabilidad que hemos mencionado (hemos escogido la mediana de la velocidad y la dirección del viento dentro de estos intervalos de inestabilidad).

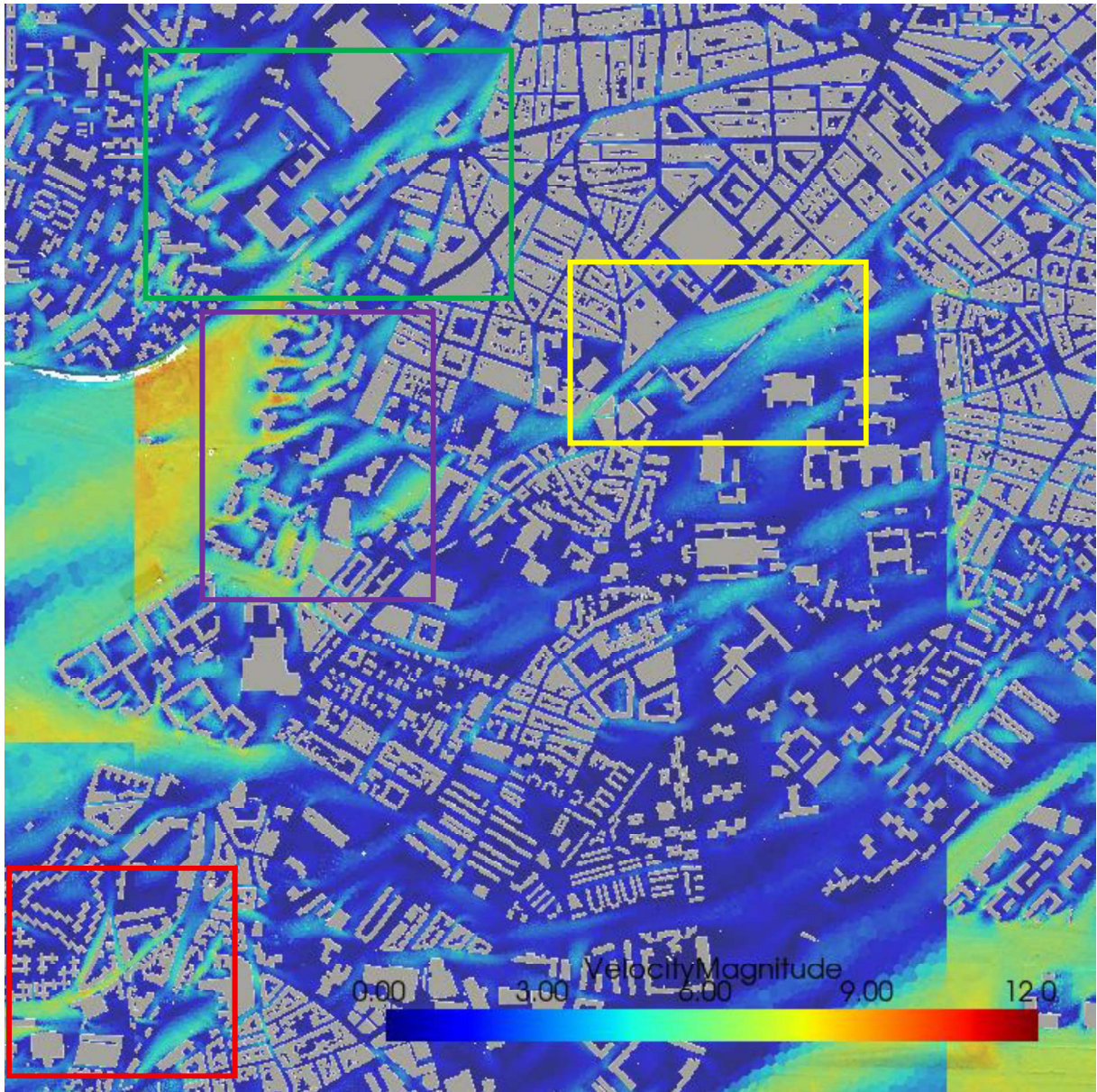
Existen otras calles que ahora muestran algunas de estas corrientes, repartidas por toda la zona de los Barrios del Distrito de Carabanchel. Muchas de ellas, como era de esperar, tienen orientación NE-SO: Calle del General Ricardos, Plaza del Conde de Eleta, Camino de los Ingenieros, etc.

Dentro de las zonas más conflictivas, sí que es cierto que muchas de ellas tienen una menor concentración de árboles, como se puede ver en la vista aérea de Google Maps. Es de destacar la corriente en la Calle Joaquín Turina (marcada en rojo en la Figura 46) por la mayor presencia de arbolado viario, además de la zona más norte, cerca de la Academia Central de la Defensa (cuadro verde), o la Academia de Mayores de Vista Alegre (amarillo). También, la zona más oeste de los edificios cercanos al Parque Ingenieros sufre grandes rachas, y tienen una cierta cantidad de árboles. La marcamos en color violeta en la Figura 46.

Para una mayor información, recomendamos de nuevo el cotejo visual de las distintas Figuras incluidas en el informe.



**Figura 45:** Barrios de Carabanchel (Caso 2). Marcamos en rojo la zona cercana al Parque Ingenieros, que es la más expuesta a vientos del suroeste.



**Figura 46:** Barrios de Carabanchel (borrasca Elsa). Destacamos con cuadros de colores las principales zonas afectadas por viento en las que existe una cierta concentración de árboles.

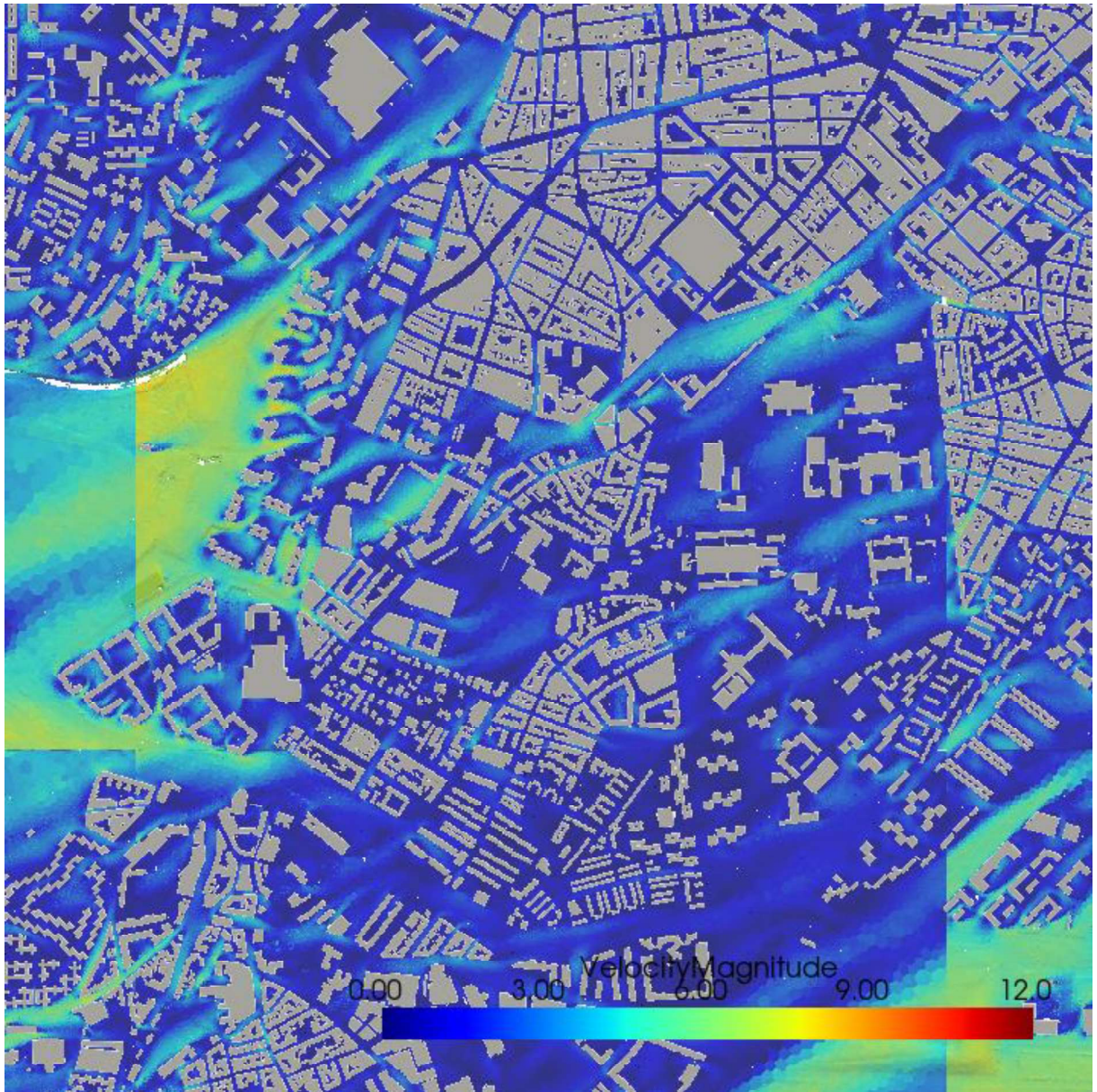


Figura 47: Barrio de Carabanchel (borrasca Herminia).

#### 4.5. BARRIO DE LA LATINA

Vamos a pasar ahora a la cuarta región marcada en la Figura 29. En este caso, estaremos trabajando con el Barrio de La Latina y el Parque de San Isidro.

En la Figura 48 podemos encontrar una vista aérea de la zona, con una vista cenital extraída de Google Maps. Como se puede observar en esta Figura, esta zona es la que está situada más al norte de nuestro dominio. Está limitada por el noroeste por la autopista A-5, que la separa de la zona de la Casa de Campo y el Zoo de Madrid; y por el este por el río Manzanares a la altura del antiguo Estadio Vicente Calderón. Al sur del barrio se encuentra la zona del Parque de San Isidro y el resto de los barrios que analizaremos en la siguiente sección.

En general, las calles de esta zona están orientadas en horizontal, por lo que no tenemos tantas partes orientadas en la dirección NE-SO, como en el caso del Distrito de Carabanchel. Esperamos, por tanto, una menor formación de corrientes intensas de viento que en el anterior caso. En las Figuras 29 y 48 también vemos una menor concentración de zonas con alta vegetación, por lo que tendremos una menor cantidad de zonas conflictivas.



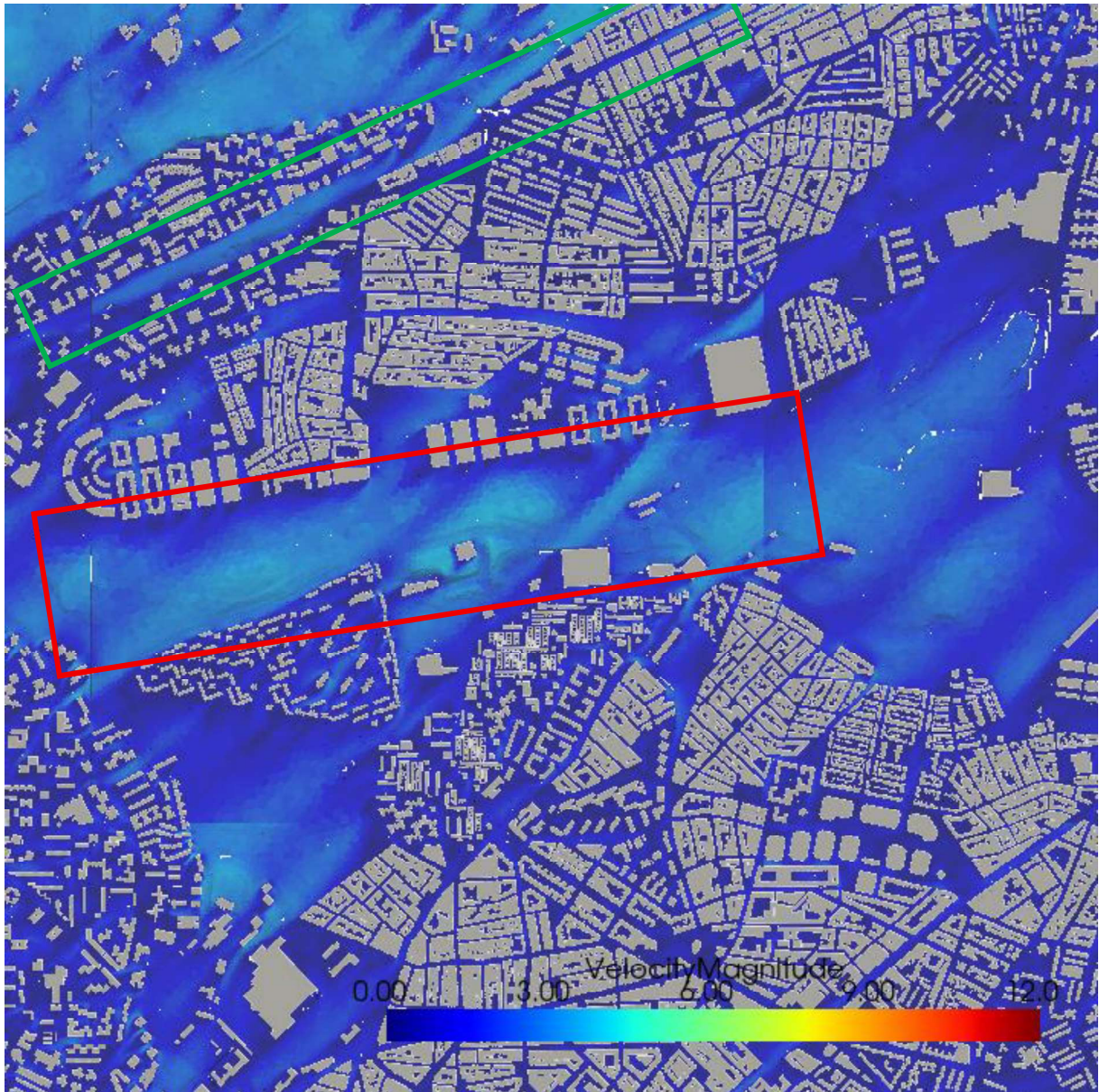
**Figura 48:** Vista cenital del Barrio de La Latina y el Parque de San Isidro.

#### 4.5.1. Viento noreste (NE)

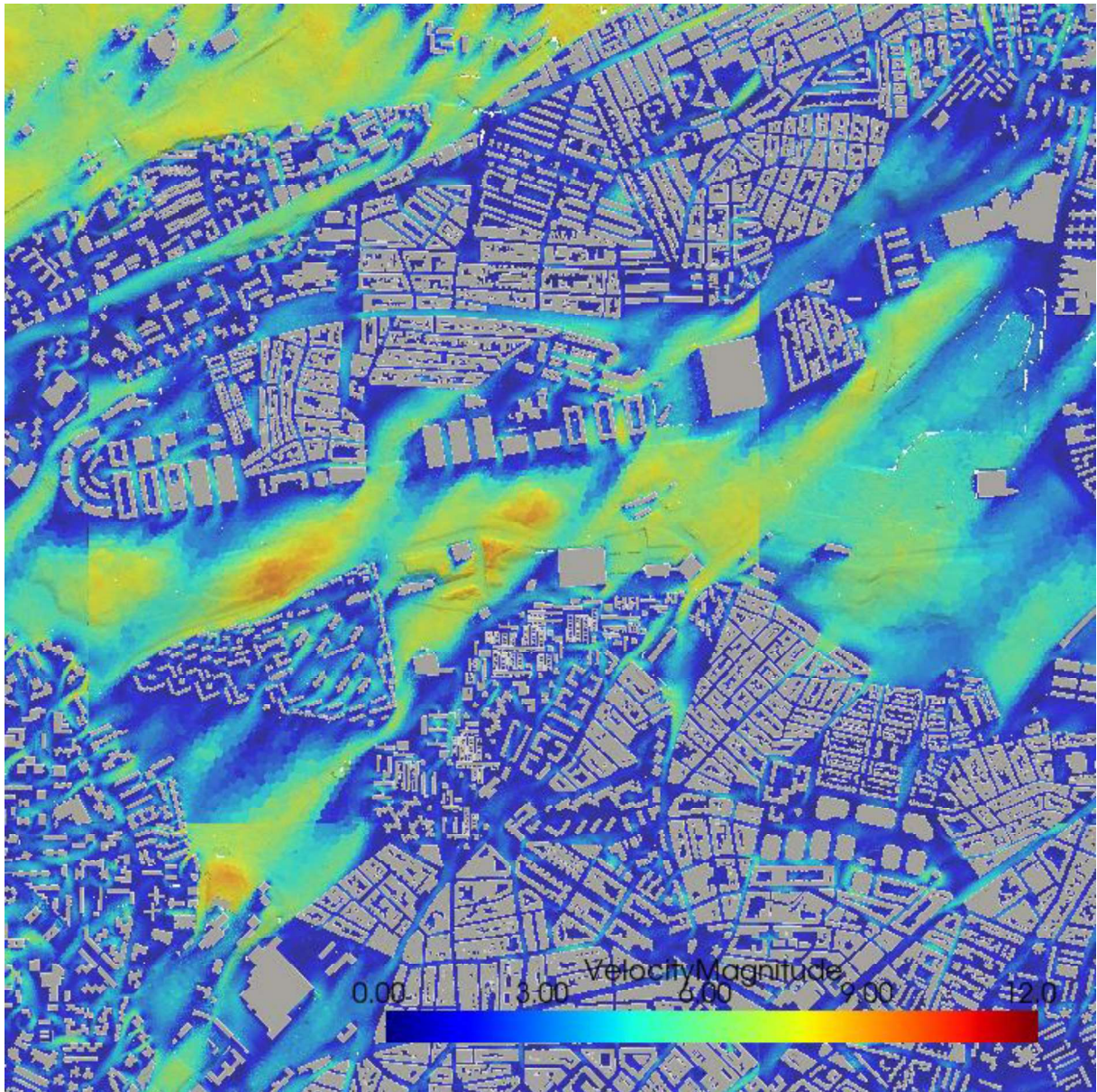
Vamos a empezar analizando los dos vientos con aire del noreste. Como podemos ver en la Figura 49, no existen grandes zonas en las que se formen rachas de viento. La zona del Parque de la Cuña Verde de La Latina (cuadro rojo) sí que forma algunas rachas bastante fuertes, pero la presencia de vegetación en esa zona es bastante más limitada que en otros casos. Sí que podemos observar, al norte del barrio, una calle con una cierta orientación diagonal en la que se forma una pequeña racha de viento (marcada con un cuadro verde), a la altura del Paseo de Extremadura y la A-5.

Dentro de las zonas con alta vegetación en este barrio, como el Parque Caramuel o el Parque de la Ermita del Santo, no observamos rachas de viento muy fuertes, aunque si nos vamos a la Figura 50 sí que observamos estos mayores valores en muchas de estas zonas (sur del Barrio de La Latina). Destacamos en la Figura 50 algunos de los lugares más conflictivos, en los que la presencia de vegetación puede llegar a suponer un problema cuando existan vientos intensos con componente noreste. Algunos de ellos son los ya mencionados Parques Caramuel, Ermita del Santo y la Cuña Verde de Latina.

En cuanto al entramado urbano, vemos algunas rachas moderadas en algunas calles como la Calle de Sepúlveda, la autopista A-5 o la zona de la Calle de Pericles. Como habíamos predicho, no tenemos grandes zonas de peligro, tanto por la orientación de las calles como por, sobre todo, la ausencia con zonas de vegetación alta.



**Figura 49:** Barrio de La Latina (Caso 1). Observamos ciertos valores reseñables en las zonas marcadas en rojo y en verde, pero en el interior del barrio observamos pocas zonas de corriente dada la orientación horizontal y vertical de las calles.



**Figura 50:** Barrio de La Latina (DANA). En este caso observamos la aparición de rachas de viento en algunas zonas abiertas pero, dada la orientación general de las calles y la ausencia de vegetación salvo en zonas muy específicas, no tenemos grandes estructuras que generen interés.

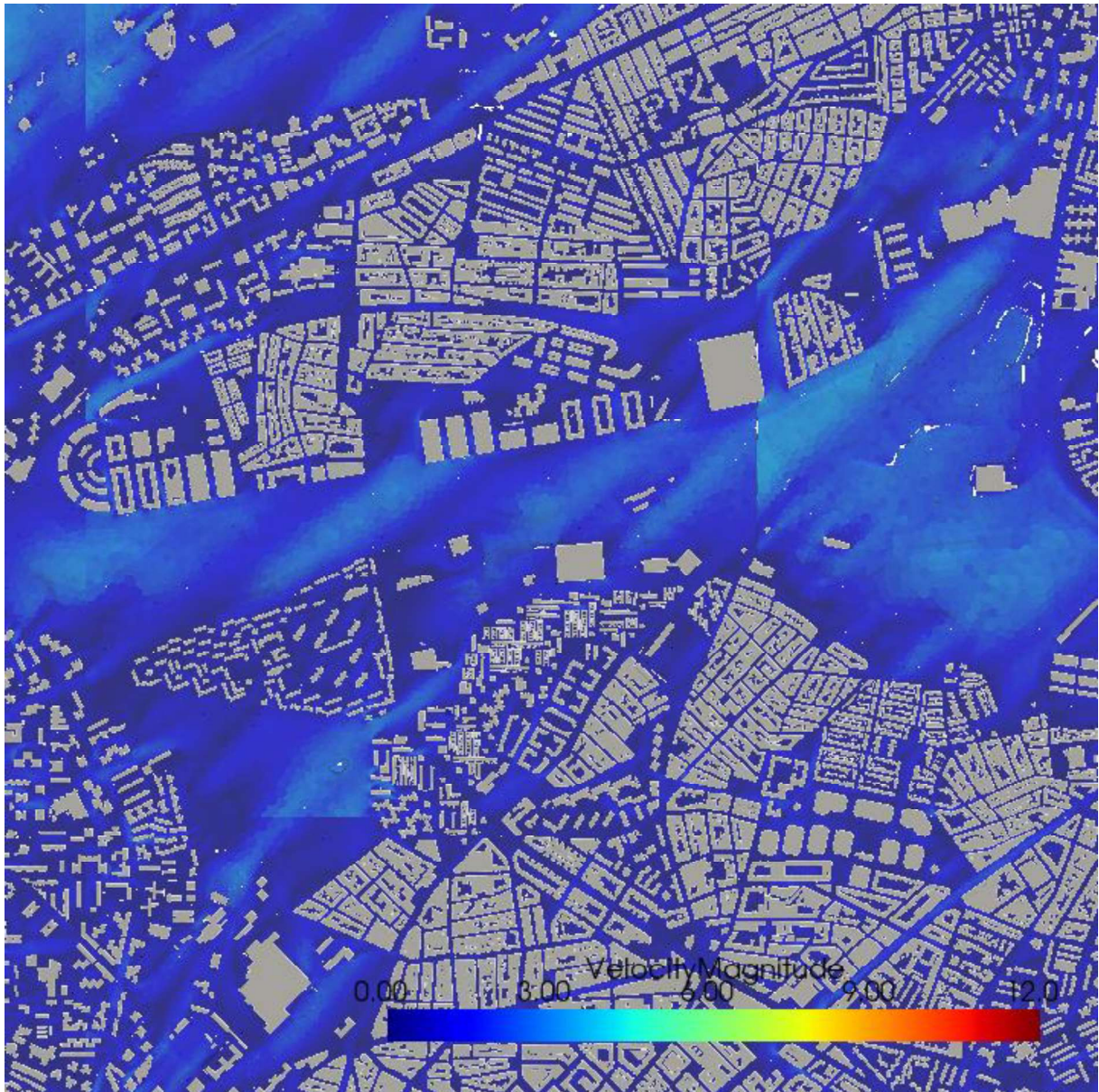
#### 4.5.2. Viento suroeste (SO)

Para el viento del suroeste, podemos ver en la Figura 51 que no existen grandes formaciones de aire intenso, de forma muy similar al viento de noreste. De nuevo, podemos justificarlo ateniéndonos a los dos factores comentados anteriormente: la orientación de las calles y la gran cantidad de edificios que rodean al barrio por la zona sur.

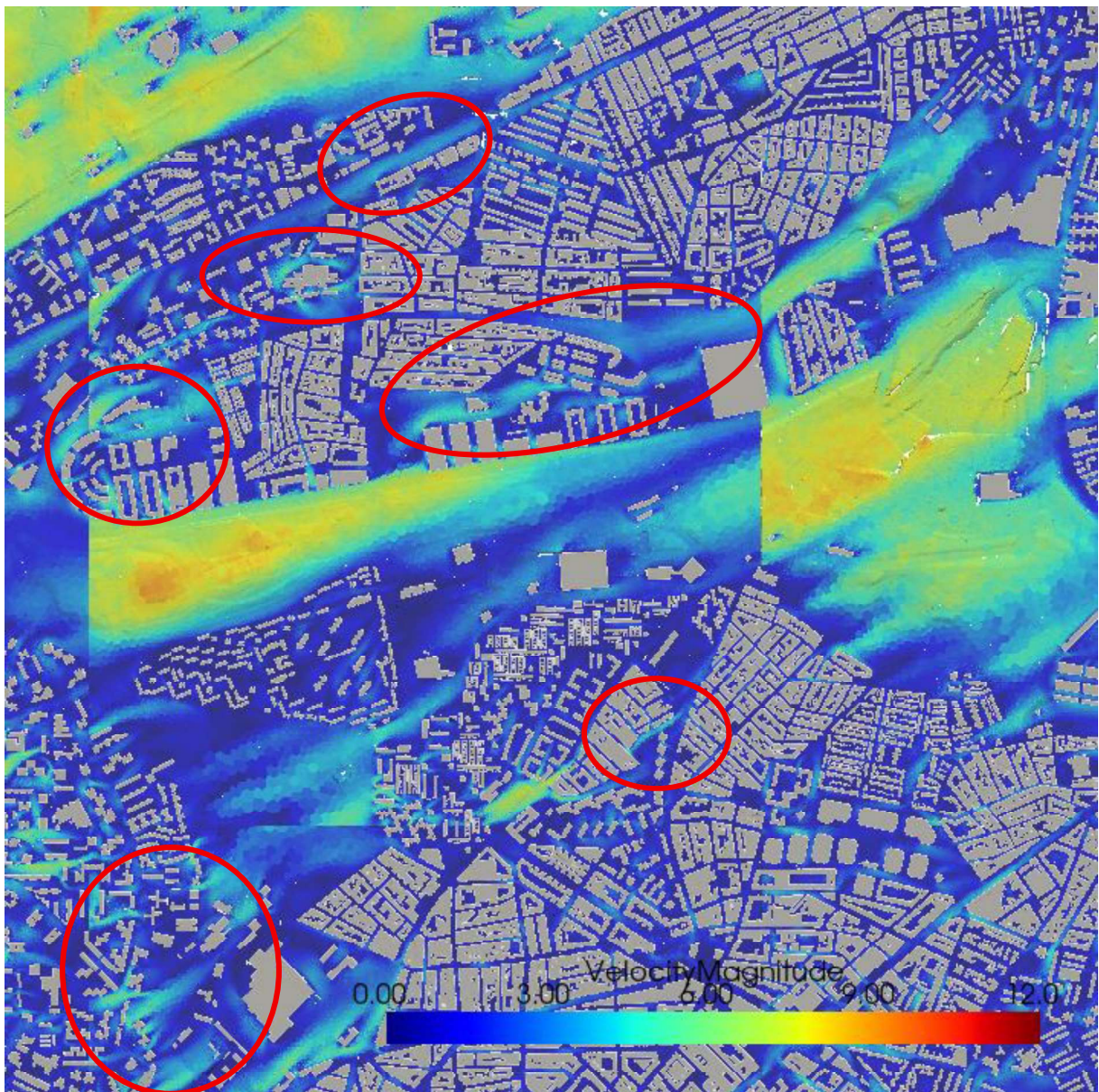
Vamos ahora a analizar el efecto de las borrascas Elsa y Herminia. Igual que en los anteriores casos, vamos a analizarlos de forma conjunta dada la similitud entre las direcciones de viento consideradas en ambos casos.

Realizando una inspección visual rápida en las Figuras 52 y 53, debemos darnos cuenta de una serie de irregularidades que aparecen en ciertas zonas del parque que separa el Barrio de La Latina de la zona norte del Barrio de San Isidro. Recordemos que nuestras simulaciones separan todo el dominio, de más de 42 km<sup>2</sup> de superficie, en varias simulaciones más pequeñas por eficiencia computacional. Pese a que estas simulaciones tienen cierto nivel de entrecruzamiento, existen determinados comportamientos que no se trasladan de una simulación a otra, y eso queda en evidencia en casos en los que hay una zona con pocos edificios. Este tipo de separaciones son mucho más suaves y casi imperceptibles en zonas con muchos edificios, pero en zonas abiertas no siempre pasa. Por ejemplo, para el caso de viento de suroeste, la simulación que está ejecutada más al oeste va a recoger el efecto de ciertos edificios o estructuras que la simulación de su lado no será capaz de recoger dada la ausencia de edificios en zonas cercanas.

Esto significa que, para este caso, los vientos tan exagerados en esa zona no son reales si vemos los que hay a su lado. De todas formas, esta zona no es de excesiva importancia puesto que la presencia de árboles es bastante limitada a tenor de lo que vemos en la Figura 29. En general, la zona de La Latina tiene pocas zonas con vegetación alta, aunque hemos destacado alguna región que puede ser de interés en las Figuras 51 y 52, como la Calle de La Latina, la Calle de Cebreros y Sepúlveda o la zona de la Calle de Zaida en la zona norte del Barrio de San Isidro.



**Figura 51:** Barrio de La Latina (Caso 2). Vemos un comportamiento similar al caso del viento de noreste (Caso 1 y DANA). Sin grandes rachas de viento bajo condiciones normales de viento del suroeste. Recordemos que el Barrio de La Latina tiene en toda la zona sur muchos más edificios, por lo que los viento llegan muy frenados.



**Figura 52:** Barrio de La Latina (borrasca Elsa). En esta imagen hay que tener cuidado a la hora de interpretar los resultados. Recordemos que habíamos dividido todo el territorio en vario subdominios, de ahí que aparezcan ciertas estructuras que parecen cortadas. Dado que el viento viene del suroeste, debemos fiarnos más de los resultados que aparezcan más cerca del oeste, por lo que esas manchas de vientos más potentes no llegan lo suficientemente frenadas por los edificios, al no estar incluido su efecto en todas las simulaciones. Vemos, sin embargo, en la zona de los edificios del barrio, algunas zonas interesantes, que marcamos en rojo.

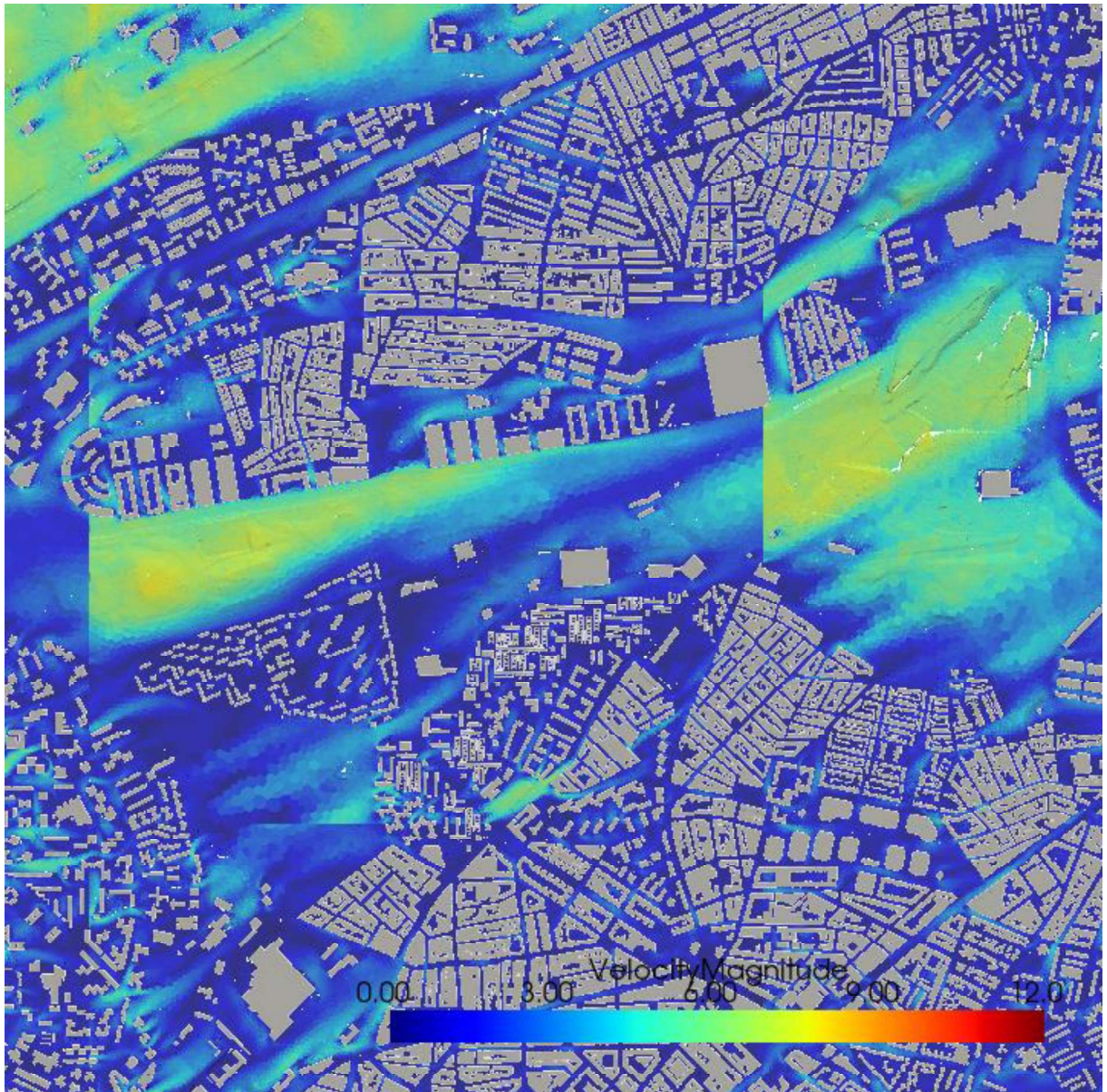


Figura 53: Barrio de La Latina (borrasca Herminia).

#### 4.6. BARRIO DE COMILLAS

Pasamos ahora a analizar el último de los barrios objeto de nuestro estudio, según lo remarcado en la Figura 29. Se trata de la zona del Barrio de Comillas y el norte del Barrio de Usera. Estos barrios están delimitados por una zona bastante urbana en todas las direcciones, así que no tendremos una dirección de viento por la que el aire se pueda colar en territorio abierto. Por el noreste, el río Manzanares conecta esta zona con el centro de la ciudad, y por el sur se encuentran otros barrios que ya hemos analizado.

Como podemos ver en la vista cenital de la Figura 54, la zona del centro de Comillas tiene una concentración de vegetación bastante importante, mucho mayor que otras zonas que ya hemos analizado, como puede ser el Barrio de La Latina. Pese a que debido a la densidad de edificios cerca del barrio no esperamos vientos muy fuertes, sí que resulta de gran interés analizar los puntos más débiles del entramado viario, poniendo especial atención en las zonas de arbolado. Además, existen un par de calles con una orientación NE-SO, en las que pondremos especial atención.



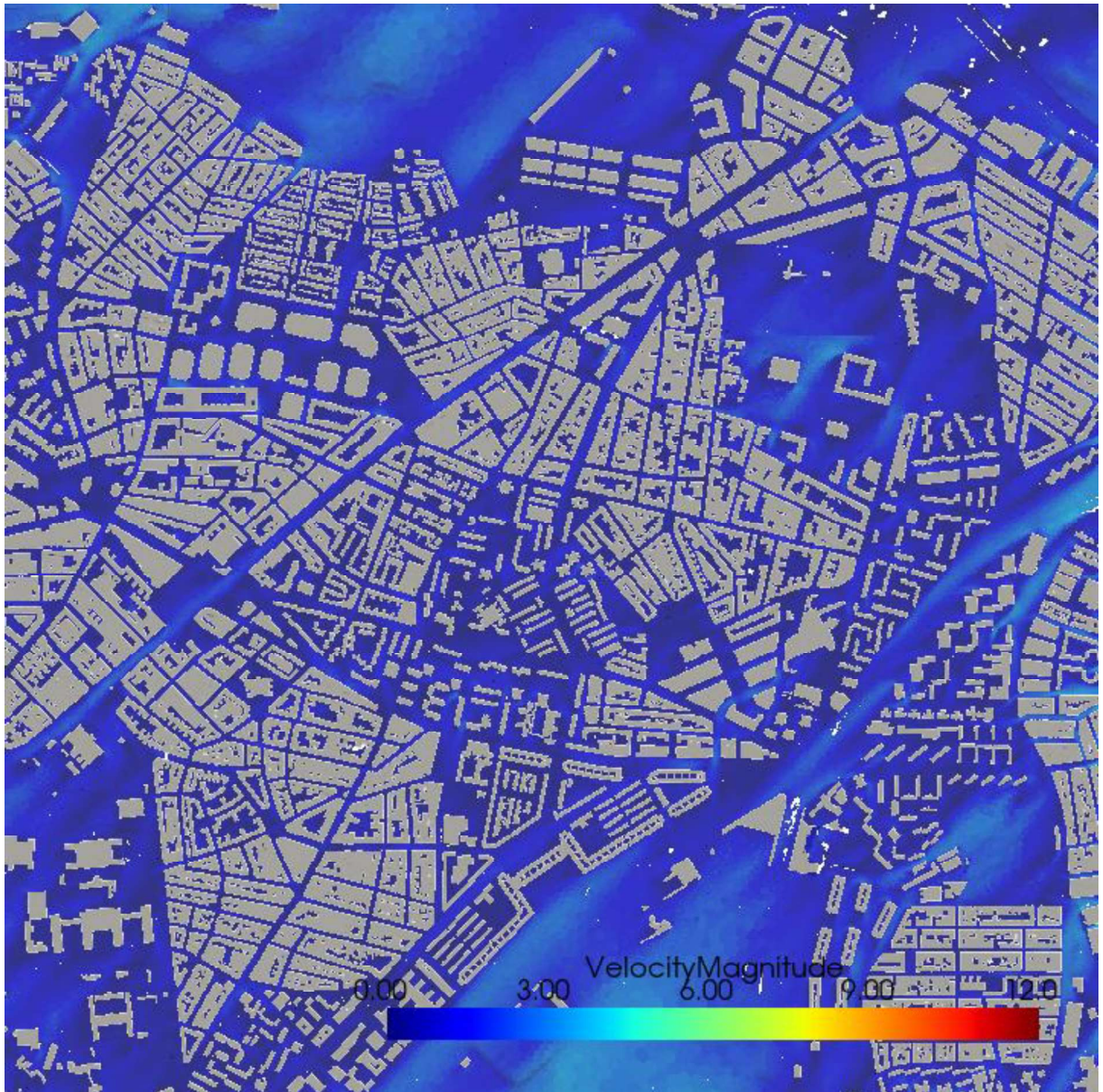
**Figura 54:** Vista cenital de los Barrios de Comillas, Usera y San Isidro.

#### 4.6.1. Viento noreste (NE)

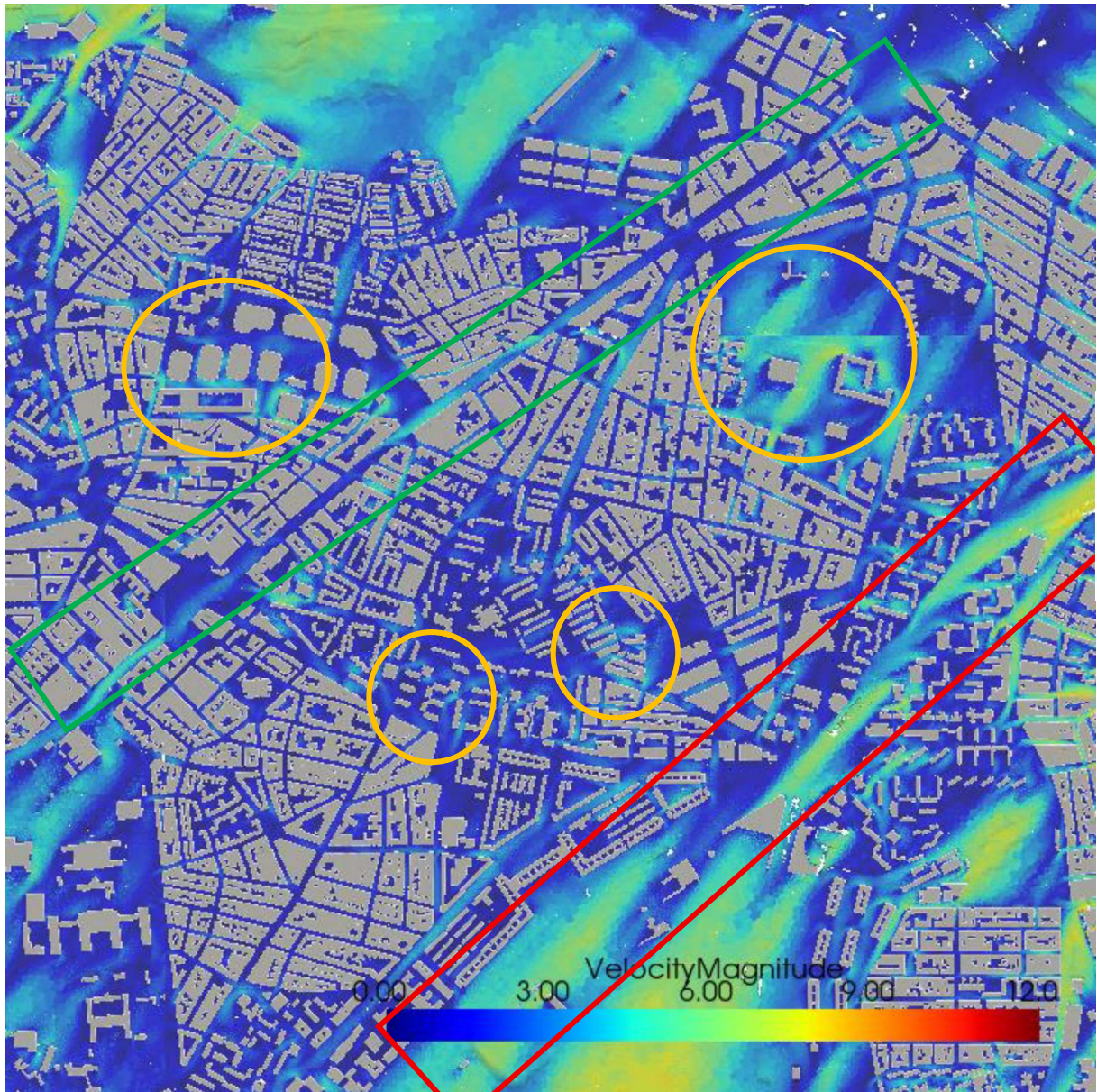
Como para el resto de los casos, vamos a empezar analizando los resultados para los vientos del noreste. Viendo la Figura 54, podemos ver que existen dos calles principales que tienen una orientación NE-SO prácticamente perfecta, lo cual puede llegar a producir vientos bastante racheados, que pueden afectar a otras calles más cercanas. Estas dos calles son la de la autopista A-42 y la Calle del General Ricardos, que es una calle bastante larga que cruza gran parte de nuestro dominio. De hecho, en el análisis de la sección 4.4 (Barrio de Carabanchel), ya la habíamos mencionado como una calle con bastante tendencia a producir vientos intensos. Toda la zona situada entre estas dos calles se corresponde con el Barrio de Comillas, que tiene una densidad de vegetación más alta que otras zonas que hemos estudiado. De hecho, tenemos una zona bastante interesante alrededor del Parque de Comillas.

Como podemos ver en la Figura 55, la calle que acompaña a la autopista A-42 sí que presenta una leve corriente, que no se traslada tanto a la Calle del General Ricardos. Dentro del barrio, observamos una zona con mayores velocidades, cerca del Parque de Comillas, pero ninguna región mucho más resaltada.

Las cosas se ponen más interesantes si nos vamos a la Figura 56, que representa el viento para el caso de la DANA. Observamos en la A-42 (marcada en rojo) y en la Calle del General Ricardos (marcada en verde), mayores zonas de corriente. También hemos marcado en naranja otras zonas del interior del Barrio de Comillas que tienen además una mayor presencia de vegetación.



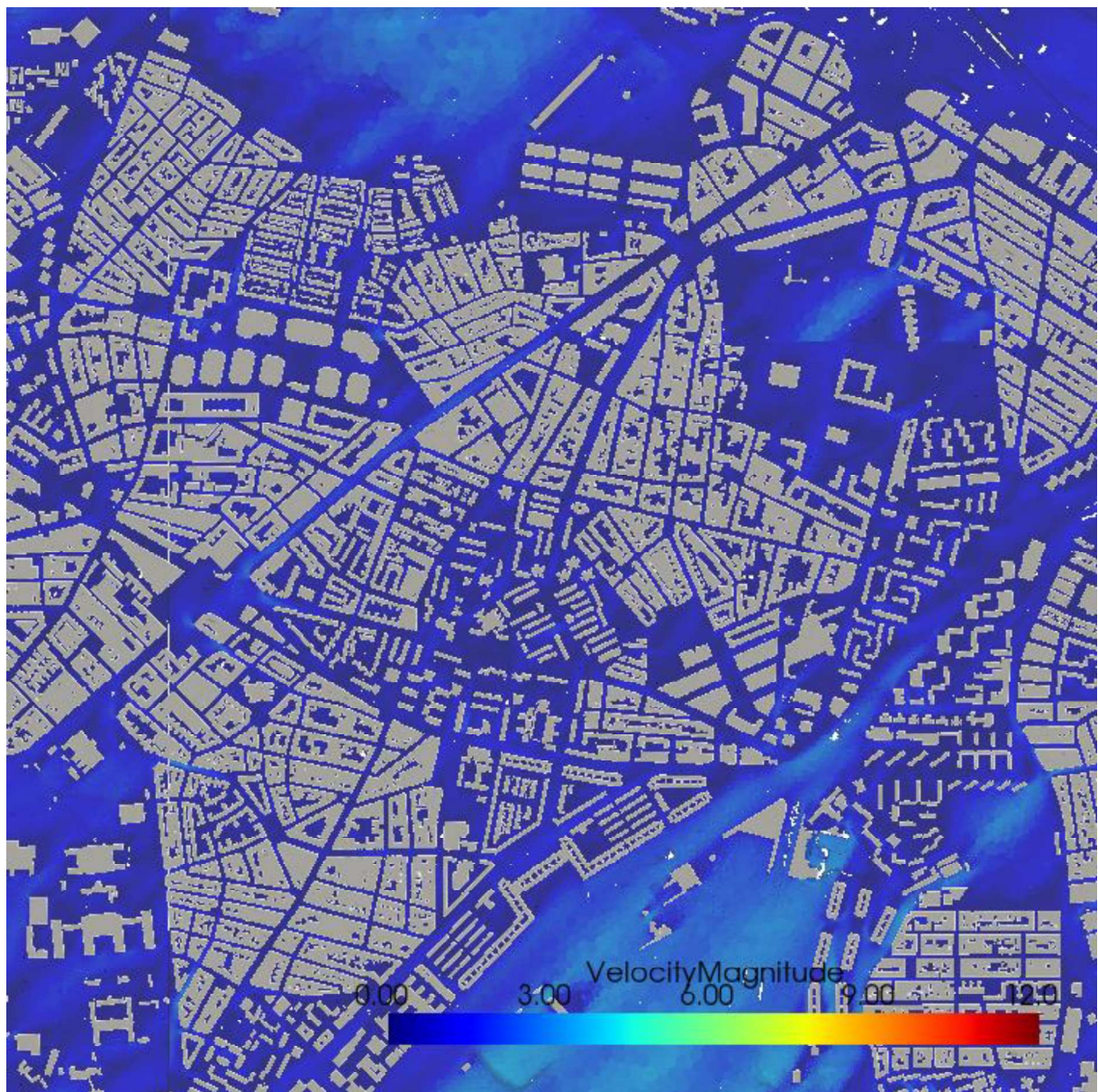
**Figura 55:** Barrio de Comillas (Caso 1). En este caso se aprecian pocas corrientes importantes, más allá de las mencionadas en General Ricardos y la A-42.



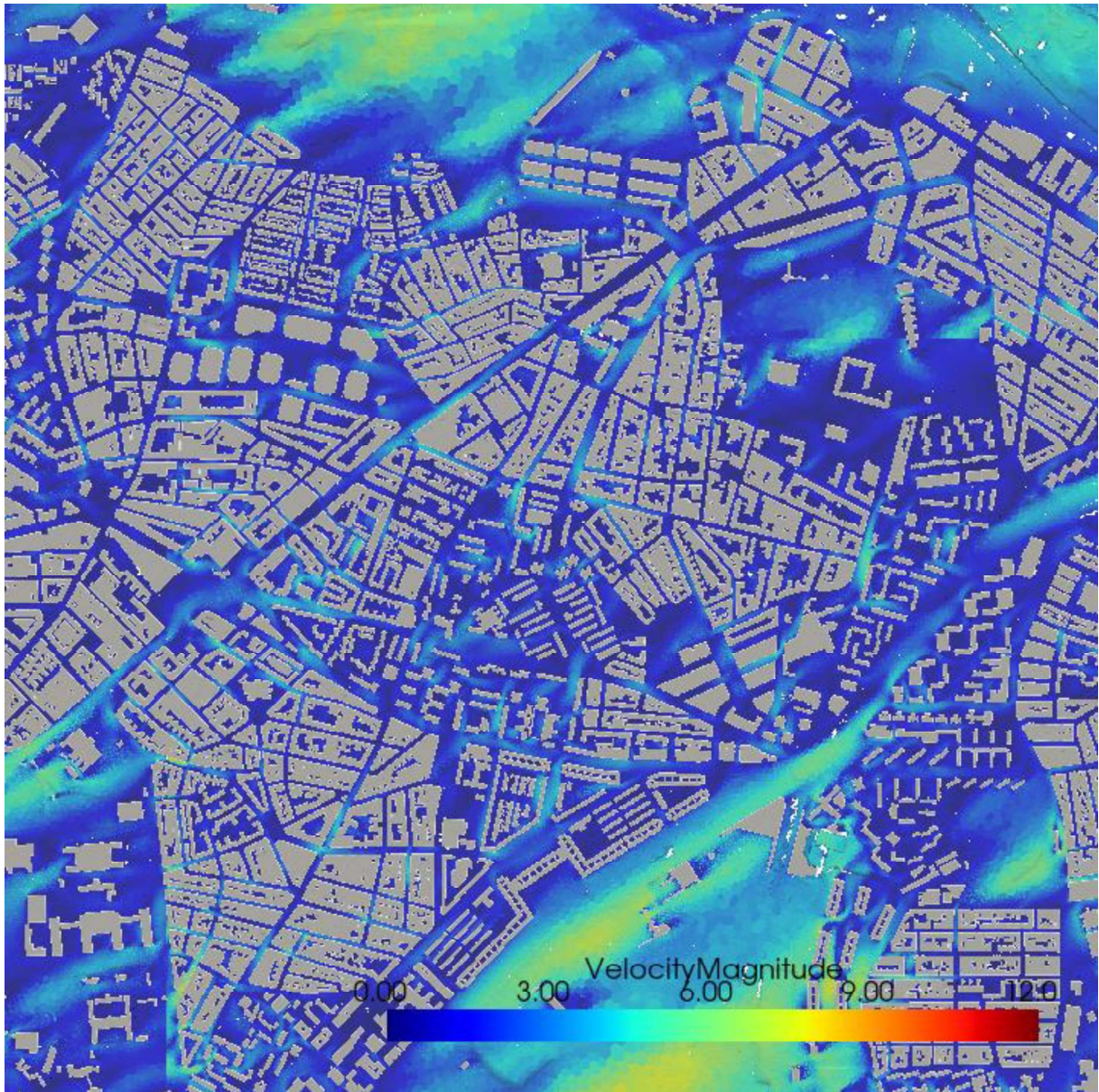
**Figura 56:** Barrio de Comillas (DANA). Vemos la formación de alguna estructura más intensa que para el Caso 1, sobre todo en ciertas zonas con presencia de arbolado, marcadas en naranja.

#### 4.6.2. Viento suroeste (SO)

Para el caso del viento del suroeste tenemos una situación muy similar al caso del viento noreste. Dominan las corrientes cerca de las dos calles principales, con la formación de pequeñas estructuras en algunas otras calles. En la Figura 57 representamos el Caso 2 con viento de suroeste, mientras que las Figuras 58 y 59 recogen las simulaciones para los casos de la Borrasca Elsa y Herminia.



**Figura 57:** Barrio de Comillas (Caso 2). Se aprecia poca velocidad de viento en general, motivada por la ausencia de zonas descubiertas cerca del Barrio de Comillas. Se trata de una zona bastante protegida de rachas de viento.



**Figura 58:** Barrio de Comillas (borrasca Elsa). En este caso se ve la formación de mayores corrientes en la zona sur (Parque de la Emperatriz María de Austria), además de las ya comentadas para el caso del viento de noreste en algunas zonas del barrio.

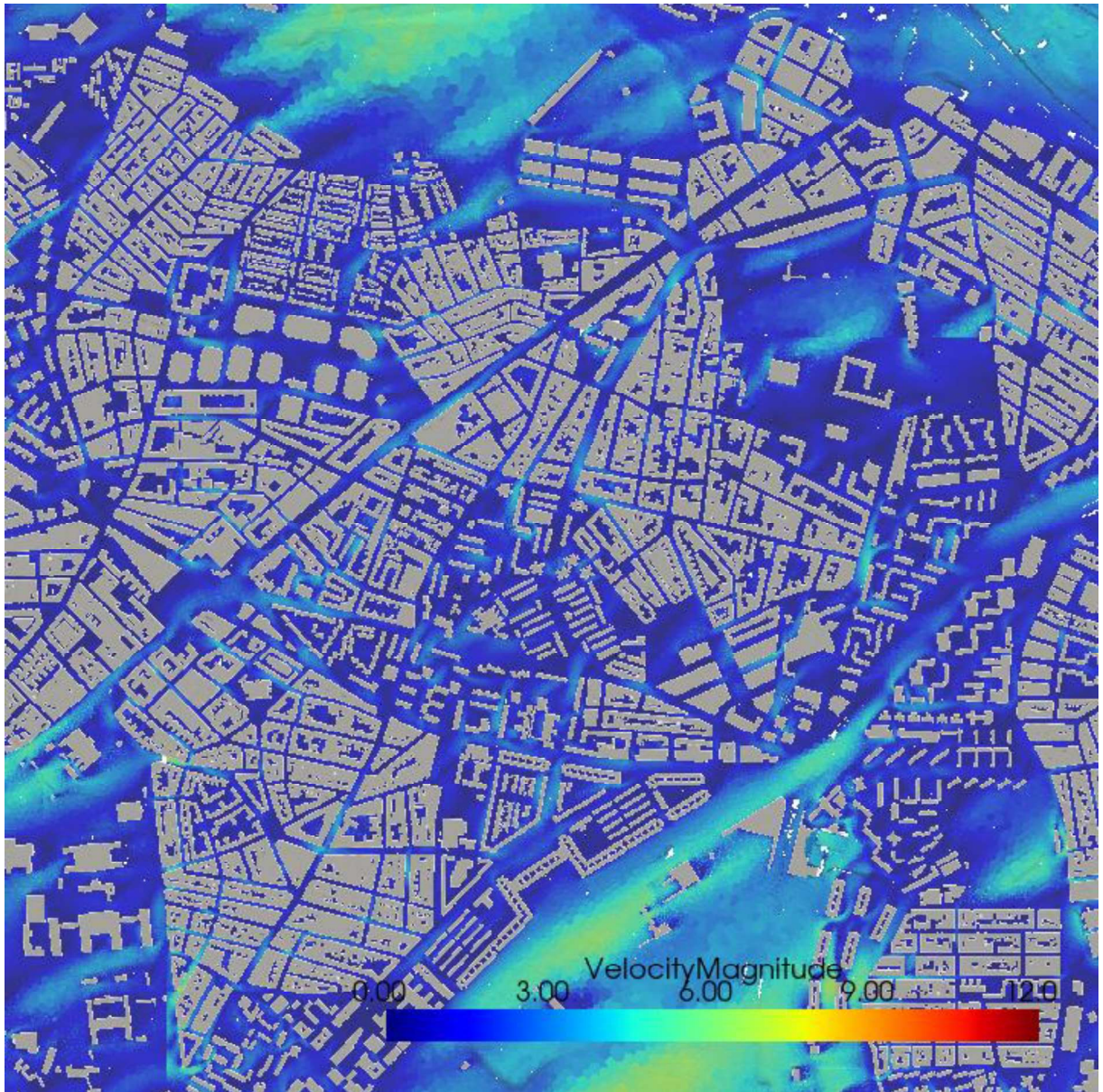


Figura 59: Barrio de Comillas (borrasca Herminia).

## 5. CONCLUSIONES

En el presente informe se plantea la realización de un análisis de las corrientes de viento que se generan en el entramado urbano de la zona suroeste de la ciudad de Madrid, mediante el uso de una herramienta de reconstrucción con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), en dos tipos de escenarios bien diferenciados: por un lado, las condiciones de viento estadísticamente más representativas y, por otro, las condiciones más adversas, correspondientes a borrascas u otros fenómenos meteorológicos extremos.

La primera parte del informe plantea la extensión del terreno, que cubre algunos barrios de la zona suroeste de Madrid: Las Águilas, Carabanchel, La Latina o Comillas. En esta primera parte se explica el funcionamiento general de la herramienta, desarrollada por Ventilatio Lab S.L., y se plantea la división del dominio total (de unos 40 km<sup>2</sup> de extensión) en pequeños subdominios más manejables computacionalmente hablando (ver Figuras 4 y 5).

Una vez explicados los tipos de datos con los que trabajamos para realizar la reconstrucción total de la geometría y generar las distintas condiciones de contorno de las simulaciones, el siguiente paso consiste en extraer las condiciones meteorológicas más relevantes. Como hemos comentado, trabajaremos con dos situaciones contrapuestas. Por un lado, realizaremos un estudio estadístico con datos de viento de más de 10 años extraídos del reanálisis de distintos modelos meteorológicos. Como se explica con mayor profundidad en el texto principal, el uso de este tipo de modelos se debe a su baja resolución, que hace que el efecto del detalle más fino (es decir, la presencia de edificios, vegetación o las formas más pequeñas del terreno) no sean tenidas en cuenta. El efecto de estos parámetros es introducido ya por nuestro modelo de simulación, por lo que este tipo de datos son justo los que necesitamos.

Realizando el análisis estadístico de esta serie de datos históricos, nos encontramos rápidamente con dos direcciones de viento claramente más frecuentes que el resto: el noreste (NE) y el suroeste (SO). Entre ambas direcciones, con cierto margen, sumamos más del 70% de los días, por lo que el estudio en otras direcciones sería prácticamente residual. De hecho, si nos fijamos en la mediana de la velocidad para cada dirección de viento, nos encontramos valores significativamente mayores para estas dos direcciones principales, con velocidades

bastante menores para el resto de los casos. Esto justifica aún más nuestra elección de solo dos direcciones de viento predominantes, puesto que las medidas en el resto de las direcciones pueden venir influenciadas por velocidades de viento muy cercanas a cero. En estos casos, la lectura de dirección es muy difusa, puesto que a bajas velocidades de viento la fiabilidad de este tipo de medidas disminuye considerablemente, y es bastante común que la dirección oscile notablemente.

Como conclusión de esta primera parte, podemos extraer que existen dos direcciones de viento predominantes para la ciudad de Madrid: noreste y suroeste. Es importante hacer notar que estas dos direcciones están alineadas, por lo que los vientos que vayan en cualquiera de las dos direcciones tendrán más tendencia a colarse por calles que tengan esta orientación (NE-SO), como se ha visto en los resultados.

El otro tipo de condiciones meteorológicas que queremos analizar son las correspondientes a circunstancias meteorológicas más adversas, tales como ciclogénesis explosivas, borrascas intensas y otro tipo de condiciones de este tipo. Para nuestro análisis, hemos considerado inicialmente dos borrascas con una incidencia clara en la ciudad: la borrasca Elsa (diciembre de 2019) y la más reciente borrasca Herminia (enero de 2025). Ambos casos se corresponden con un viento de componente suroeste (SO), por lo que aquí podemos hacer la primera relación entre las borrascas y este tipo de vientos del Atlántico. Puesto que ambas borrascas tenían, en sus momentos de mayor incidencia, una dirección muy similar a uno de los casos estadísticamente más representativos (SO), nuestro siguiente objetivo fue encontrar un caso con viento de NE con rachas de viento más fuertes. Eso lo encontramos para el caso de la DANA de octubre de 2024, que pese a haber impactado con más fuerza en zonas del Levante peninsular, también registró fuertes vientos en la península. Esto refuerza aún más la idea de que, en general, las borrascas vienen acompañadas de vientos del suroeste, puesto que nos hemos tenido que ir a un caso de una DANA, que no tiene nada que ver con una borrasca, para encontrar vientos de gran intensidad y de componente noreste.

Así pues, hemos trabajado con 5 casos distintos, que se pueden reducir a 4 teniendo en cuenta la gran similitud entre las borrascas Elsa y Herminia: un caso moderado y otro más intenso para cada una de las dos direcciones de viento más comunes. Esto nos permitirá realizar un análisis de las principales diferencias entre un día estándar y otro bajo la influencia de

inestabilidad meteorológica, cubriendo la mayor parte de días con estas dos direcciones predominantes.

El análisis extenso de cada región en concreto de nuestro dominio puede ser encontrado en su sección correspondiente (secciones 4.2-4.6), según lo dispuesto en la Figura 29. A modo de conclusiones generales, podemos extraer una bastante importante. La densidad de edificios alrededor de una determinada zona es de vital importancia para conocer las corrientes que se formarán entre las calles. Por ejemplo, para el caso del Barrio de Las Águilas, delimitado en su frontera suroeste por el Aeropuerto de Madrid Cuatro-Vientos, hace que los vientos provenientes de esa dirección incidan mucho más intensamente que en el resto de los barrios, que están delimitados por ese lado por otras zonas de edificios. Como conclusión general, podemos extraer que las calles orientadas en la dirección NE-SO son mucho más proclives a contener mayores rachas de viento, mientras que calles como las del Barrio de La Latina, con orientación N-S o E-O contienen mucho mejor los vientos predominantes. Por ejemplo, calles como la del General Ricardo, que cruzan prácticamente todo el dominio desde el Barrio de Comillas hasta el Barrio de Carabanchel, son capaces de contener grandes rachas únicamente por su orientación, lo que además desemboca en algunas recirculaciones notables en las calles colindantes. Como punto de comparación con este hecho, podemos destacar la Avenida de Los Poblados, que cruza el dominio en sentido contrario (NO-SE), y que tiene una incidencia de viento mucho menor, concentrándose las mayores rachas de viento en las calles colindantes, orientadas perpendicularmente a ella.

Atendiendo a lo mencionado anteriormente, las zonas más abiertas son especialmente susceptibles de contener rachas de viento más intensas en episodios de inestabilidad, por lo que los distintos parques de la ciudad deben ser especialmente considerados a la hora de tomar medidas de precaución. A lo largo del informe hemos mencionado algunos de estos parques, aunque no hemos hecho demasiado hincapié en ellos puesto que suelen ser los primeros lugares que se cierran antes episodios de viento intenso. A lo largo del informe hemos señalado distintas zonas con mayores índices de vegetación en ciertas calles o manzanas, que por su mayor cantidad de árboles pueden ser zonas de especial interés. El cotejo visual de las Figuras 19-28 es de gran importancia para la identificación de algunas de estas zonas.

A modo de cierre, los resultados obtenidos muestran que la interacción entre la dirección predominante del viento y la morfología urbana condiciona de forma determinante la distribución de rachas y canalizaciones dentro del entramado de la zona suroeste de Madrid. La combinación de un análisis estadístico de largo plazo con casos meteorológicos extremos permite no solo identificar las direcciones más probables y su impacto típico, sino también estimar las condiciones de mayor severidad que podrían experimentarse en episodios puntuales. En conjunto, este estudio evidencia la necesidad de considerar cuidadosamente la orientación de las vías, la densidad edificatoria y la presencia de grandes espacios abiertos en futuros desarrollos urbanos, tanto para mejorar el confort peatonal como para anticipar zonas potencialmente vulnerables frente a episodios de viento intenso, específicamente en zonas con grandes índices de vegetación.

## 6. NOTA

La animación que se entrega con este informe corresponde a líneas de corriente de la zona marcada en rojo en la Figura 4 del presente informe que coincide con los barrios de Vista Alegre y Puerta Bonita.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Suárez-Vázquez, M., Ballesta, S. V., Otero-Cacho, A., Muñuzuri, A. P., & Mira, J. (2025). A fast and automated approach for urban CFD simulations: validation with meteorological predictions and its application to drone flights. *Urban Climate*, 64, 102664.
- [2] Alonso, M. C., & Malpica, J. A. (2010). Satellite imagery classification with LiDAR data. *Trees (A)*, 2106(19), 11.
- [3] Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, environment and urban systems*, 59, 25-37.
- [4] Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and environment*, 91, 219-245.
- [5] Parente, A., Górlé, C., van Beeck, J., & Benocci, C. (2011). A comprehensive modelling approach for the neutral atmospheric boundary layer: consistent inflow conditions, wall function and turbulence model. *Boundary-layer meteorology*, 140(3), 411-428.
- [6] Wieringa, J. (1992). Updating the Davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41(1-3), 357-368.
- [7] Fu, R., Pađen, I., & García-Sánchez, C. (2024). Should we care about the level of detail in trees when running urban microscale simulations? *Sustainable Cities and Society*, 101, 105143.
- [8] Pađen, I., García-Sánchez, C., & Ledoux, H. (2022). Towards automatic reconstruction of 3D city models tailored for urban flow simulations. *Frontiers in Built Environment*, 8, 899332.

VARELA  
BALLESTA  
SYLVANA  
VERONICA -  
48137538X

Firmado digitalmente  
por VARELA  
BALLESTA SYLVANA  
VERONICA -  
48137538X  
Fecha: 2025.12.03  
11:55:06 +01'00'

Sylvana Verónica Varela Ballesta

CTO Ventilatio Lab. S.L.