

Simulation of complex topographies for wind engineering

Federico Bacchi  and Ana Scarabino 

¹ Grupo de Fluidodinámica Computacional GFC, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.

Abstract. This work describes the methodology employed by the Computational Fluid Dynamics Group (GFC) for the numerical simulation of wind fields in environments with complex terrain. The pre-processing workflow based on Geographic Information System (GIS) data is detailed, along with domain discretization strategies and the setup of Computational Fluid Dynamics (CFD) models for analyzing the atmospheric boundary layer in critical infrastructure projects. Examples applied to specific projects are also presented.

Keywords: CFD, wind engineering, complex topography.

Simulación de topografías complejas para ingeniería del viento

Resumen. El presente trabajo describe la metodología empleada por el Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC) para la simulación numérica de campos de viento en entornos con orografía compleja. Se detalla el proceso de pre-procesamiento mediante datos de Sistemas de Información Geográfica (GIS), las estrategias de discretización del dominio y la configuración de modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para el análisis de la capa límite atmosférica en proyectos de infraestructura crítica, y se muestran ejemplos aplicados a proyectos específicos.

Palabras clave: CFD, ingeniería del viento, topografía compleja.

Introducción

La caracterización del campo de viento en entornos de topografía compleja es un aspecto central en el diseño y evaluación de infraestructura crítica, particularmente en aplicaciones como la energía eólica, obras de gran escala y estudios de impacto ambiental. La interacción entre la capa límite atmosférica (ABL) y la orografía genera fenómenos como aceleraciones locales, separación de flujo y efectos de canalización, cuya adecuada predicción requiere el uso de herramientas numéricas avanzadas.

El campo de vientos en micro/meso escala de un sitio tiene una influencia considerable en muy diversos problemas, tales como la determinación de cargas eólicas estructurales, confort y seguridad para actividades humanas, protección eólica de cultivos, potencial para la generación de energía eólica, u operaciones aéreas a baja altura (aeropuertos, helipuertos, vigilancia, rescate, etc.). El estudio específico de cada una de ellas requiere de datos meteorológicos (locales, satelitales, relevamientos regionales) y metodologías que varían según el tipo de problema a estudiar. Para cargas de viento sobre construcciones de geometrías convencionales (edificios prismáticos, techos planos con pendiente a dos o cuatro aguas), hay fórmulas específicas, detalladas en el Reglamento INTI-CIRSOC 102 (2005), de aplicación en nuestro país. Estas contemplan factores de amplificación de cargas ante algunas características topográficas simplificadas, como laderas o colinas. Cuando la geometría de la edificación no es convencional, la recomendación es realizar un estudio en un modelo a escala, en un “túnel de viento de capa límite”, respetando el perfil de velocidades de viento y las características de la turbulencia atmosférica del sitio de emplazamiento (Boldes et al, 1995). Sin embargo, en el caso de sitios con topografías geográficas complejas, las dimensiones típicas de los accidentes topográficos requieren que la escala del modelo físico de la edificación en estudio se vuelva demasiado pequeña para obtener resultados confiables, por lo que en entornos topográficos complejos los estudios en túnel de viento tienen aplicabilidad limitada, y se opta por estudios numéricos en escala real, utilizando herramientas de ingeniería de vientos computacional (CWE), una disciplina de amplio crecimiento en las últimas décadas (Potsis et al, 2023).

En el caso de evaluaciones de potencial eólico, el problema de determinar la influencia de la topografía es bastante frecuente, ya que las aceleraciones del viento en sitios altos permiten un obtener mayor potencia. En estos casos, mediciones anemométricas “in situ” se complementan con datos satelitales y estudios numéricos con software especializado, como WASP (Troen & Petersen, 1989), que utiliza ecuaciones de conservación de masa y algoritmos de interpolación de datos de referencia para obtener estimaciones de potencial eólico en la zona de interés.

En el caso de los aeropuertos, la dirección e intensidad de los vientos predominantes constituyen uno de los criterios fundamentales para la orientación de las pistas, debido a la influencia de los vientos cruzados sobre las operaciones de despegue y aterrizaje (ICAO, 2022). Si bien estas variables se obtienen principalmente a partir de registros meteorológicos de largo plazo y campañas de medición “in situ”, la influencia de la topografía y del entorno construido sobre la estructura del flujo atmosférico puede generar fenómenos de cizalladura, aceleraciones locales y aumento de la intensidad turbulenta, cuya evaluación suele requerir mediciones especializadas, ensayos en túnel de viento o simulaciones numéricas avanzadas (Chan, 2011). Un ejemplo de simulaciones numéricas puede verse en el estudio de Tse et al, 2021, sobre el entorno eólico del Aeropuerto Internacional de Hong Kong. Este estudio, si bien describe las características de la malla de cómputo, no profundiza en las herramientas empleadas para pasar de los datos satelitales a una superficie mapeable para el solver utilizado, un proceso que no es trivial y que describimos en detalle en este trabajo.

En este marco, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta clave en la ingeniería del viento, permitiendo analizar en detalle la interacción entre la ABL y el entorno construido (Blocken, 2015). A diferencia de los métodos normativos basados en cargas fijas, la CFD proporciona una resolución espacial completa de los campos de velocidad y presión, posibilitando la identificación de fenómenos complejos como el desprendimiento de vórtices y la recirculación a sotavento de las edificaciones, y la aceleración inducida por la topografía, siendo este uno de los grandes desafíos planteados a finales del siglo XX (Stathopoulos, 1997).

Uno de los principales desafíos en este tipo de simulaciones radica en la representación geométrica del terreno, cuya fidelidad impacta directamente en la calidad de los resultados. La disponibilidad de datos geoespaciales de alta resolución, tales como relevamientos LiDAR y modelos digitales de elevación (DEM) derivados de sensores satelitales (Maune & Nayegandhi, 2018; Liu, 2008), ha permitido mejorar significativamente la precisión de los modelos, aunque a costa de una mayor complejidad en las etapas de preprocesamiento. Estos datos requieren procesos de depuración que incluyen filtrado de ruido, eliminación de artefactos y, según el objetivo del estudio, clasificación del terreno para remover o conservar elementos como vegetación y edificaciones (Jaboyedoff et al., 2012).

Desde el punto de vista del modelado físico, la precisión de las simulaciones en topografías complejas depende de la adecuada representación de la rugosidad del terreno y de la estructura de la turbulencia incidente. El enfoque más extendido es el uso de las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas por Reynolds (RANS), usualmente cerradas mediante modelos de dos ecuaciones, como el k - ϵ Realizable, seleccionado por su robustez y eficiencia computacional en flujos con fuertes gradientes de presión y curvatura de líneas de corriente (Shih et al., 1995).

Asimismo, la integración de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) ha permitido alcanzar altos niveles de fidelidad en la generación de modelos topográficos, facilitando la evaluación de sitios críticos como granjas eólicas en zonas montañosas (Han & Stoellinger, 2020).

Pese al número creciente de estudios de este tipo, en los reportes y publicaciones mencionados, la metodología de creación de la malla de cómputo es mencionada de forma escueta o poco detallada, mientras el foco se centra en las ecuaciones a resolver, los modelos de turbulencia utilizados y las condiciones de borde planteadas.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo describir en detalle la metodología desarrollada por el Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC) para la construcción de dominios CFD en entornos de topografía compleja, abarcando desde la digitalización del relieve hasta la definición de las condiciones de contorno, e integrando herramientas GIS, modelado geométrico paramétrico y técnicas de discretización numérica, de forma que esta metodología sea replicable para distintos estudios de ingeniería de vientos.

2. Metodología

2.1 Descripción General

El procesamiento inicial se realiza en plataformas de Sistemas de Información Geográfica (GIS), tales como ArcGIS o Global Mapper, donde se generan curvas de nivel a partir de un modelo digital de elevación (DEM) mediante algoritmos de interpolación y muestreo espacial (Burrough et al., 2015; Li et al., 2005). La equidistancia entre curvas se selecciona en función de la resolución del conjunto de datos original y del nivel de detalle requerido para la simulación. Posteriormente, estas curvas son exportadas en formato CAD (DXF), asegurando la conservación de la referencia espacial y la coherencia métrica del modelo.

Las curvas de nivel son luego importadas en un entorno de modelado geométrico, específicamente Rhinoceros(R) , donde se implementa un algoritmo de reconstrucción superficial desarrollado por nuestro Grupo de Fluidodinámica Computacional - GFC mediante “scripting paramétrico” en Grasshopper. Este procedimiento permite transformar la información discreta contenida en las curvas en una superficie continua (típicamente NURBS o malla suavizada), mediante técnicas de interpolación y ajuste que consideran tanto la conectividad entre curvas como la minimización de irregularidades locales (Piegl & Tiller, 1997; Botsch et al., 2010; Kazhdan & Hoppe, 2013). El algoritmo incorpora una serie de parámetros controlables por el usuario, entre los que se incluyen: tolerancias geométricas, criterios de suavizado, densificación de puntos de control y restricciones de pendiente máxima. Esto permite ajustar el balance entre fidelidad geométrica respecto de los datos originales y regularidad superficial, lo cual resulta fundamental para evitar la generación de geometrías no aptas para mallado (por ejemplo, discontinuidades, pliegues o gradientes excesivos, Botsch et al., 2010). Adicionalmente, se contemplan estrategias de simplificación geométrica orientadas a reducir la complejidad del modelo sin comprometer los fenómenos de interés, tales como la eliminación de detalles sub-resolución respecto del tamaño de celda esperado en la malla CFD. Este paso es clave para optimizar los tiempos de cálculo y garantizar la estabilidad numérica de la simulación (Thompson et al., 1999; Blocken, 2015).

El enfoque paramétrico adoptado no solo permite la reproducción sistemática del proceso, sino también la exploración de distintos escenarios de resolución geométrica, facilitando análisis de sensibilidad asociados a la topografía. La superficie resultante es finalmente sometida a procesos de validación geométrica, que incluyen inspección de continuidad, verificación de pendientes y comparación con el modelo altimétrico original (Franke et al., 2007).

Finalmente, la geometría es acondicionada para su integración en el dominio computacional, lo que implica su recorte, extensión o adaptación según los requerimientos del caso de estudio, así como su preparación para la etapa de mallado, asegurando compatibilidad con los criterios de calidad exigidos por los modelos CFD utilizados (Franke et al., 2007; Toparlar et al., 2017).

La Fig. 1 ilustra la secuencia completa de análisis de un problema de vientos en una topografía compleja, desde la obtención de los datos geográficos hasta el

postprocesamiento de los resultados de la simulación. Los pasos se detallan en las siguientes secciones.

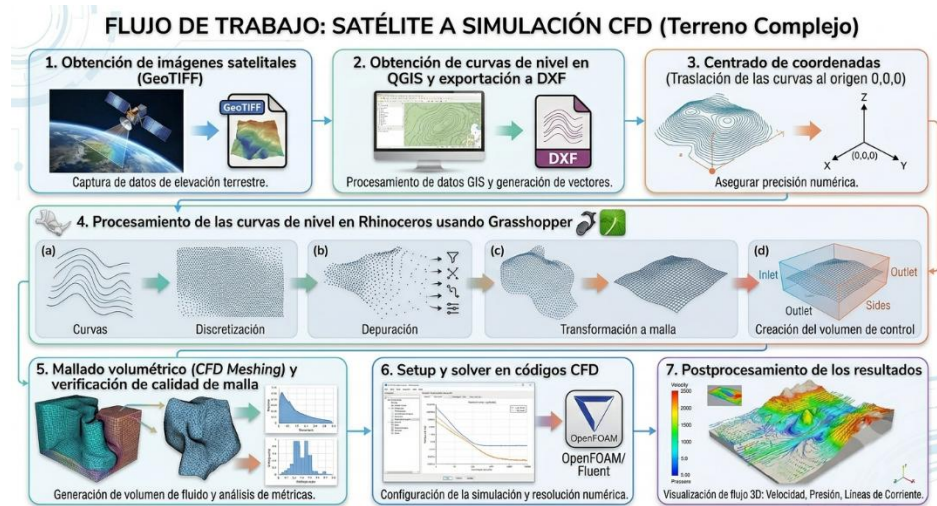


Fig. 1: Pasos metodológicos para la creación del CAD

2.2 Pasos Metodológicos

Ante la ausencia de modelos CAD previos de los sitios de estudio, se procede a la digitalización basada en Sistemas de Información Geográfica (GIS):

Paso 1: Obtención de datos. Se utilizan coordenadas y elevación provenientes de organismos estadísticos (ej. Instituto Geográfico Nacional) o de imágenes satelitales (ej. Google Earth), GeoTIFF. El resultado es una nube de puntos (coordenadas y elevaciones) o bien un archivo “raster” genérico, que debe convertirse en la superficie del terreno a estudiar.

Paso 2: Obtención de curvas de nivel. A partir de los datos GIS, se generan curvas de nivel con resolución de hasta 1 metro. Para este paso se utiliza software GIS como QGIS (gratuito) u otros comerciales. Las curvas se exportan como archivos DXF.

Paso 3: Centrado de coordenadas. Traslación de las curvas al origen (0,0,0) con el que se realizará el análisis numérico, paso necesario para mejorar la precisión de los resultados.

Paso 4: Generación de superficie. Las curvas de nivel son procesadas en software de modelado (RhinocerosTM + Grasshopper) para obtener la superficie en relieve. Con el mismo software se discretiza la superficie y se genera el volumen de cómputo. De

ser necesario, en esta etapa se agregan edificaciones que tengan influencia en el campo de vientos y no hayan podido ser relevadas mediante el procesamiento de imágenes. El dominio de cómputo es un volumen espacial que abarca desde el suelo y los elementos de la topografía hasta una altura suficiente en la que se puedan imponer condiciones de viento que no modifiquen la solución sobre la zona de interés. Según la topografía, se puede optar por definir como frontera superior un plano lo suficientemente alejado del suelo (diez o más veces la mayor altura de las edificaciones), o bien, en casos de grandes variaciones de altura, una superficie que copie la orografía subyacente manteniendo una altura constante sobre la vertical. De la misma forma se limitan superficies de entrada y/o salida del flujo de aire, a una distancia suficiente para que las condiciones impuestas al flujo no sean influenciadas por la solución en la zona de interés. En las fronteras del dominio (suelo, “techo”, paredes, límites laterales) se imponen las condiciones de borde que se detallan en el punto 2.5.

Paso 5: Mallado volumétrico y verificación de calidad de malla. Se utiliza Ansys Meshing u otros programas de mallado, como ICEM, ANSA o Salome, y se verifica la calidad de los elementos generados.

El dominio de cómputo se divide en elementos (celdas) mediante mallas no estructuradas para adaptarse a las irregularidades del terreno. La resolución de la malla es variable, incrementando la densidad de elementos en zonas críticas como el nivel peatonal, envolvente de edificios, zonas de inyección de contaminantes, o áreas de aproximación de aeronaves. Las “buenas prácticas de CFD” demandan tests de independencia del mallado: esto es, verificar que la solución de las variables de interés no se modifica sensiblemente si se utiliza una malla más refinada que la actual. Dependiendo de la extensión y complejidad del área, los modelos pueden oscilar entre 1 millón y más de 20 millones de elementos para garantizar la convergencia.

Paso 6: Definición del setup y solver para la simulación. Esta etapa se realiza en el programa de cómputo que resolverá las ecuaciones del flujo: Ansys Fluent, CFX, OpenFoam, Star CCM+ u otros.

Las simulaciones se ejecutan bajo las siguientes premisas de mecánica de fluidos:

- **Régimen:** Usualmente los cambios de densidad del aire por altura o gradientes térmicos no afectan los resultados a nivel peatonal ni las cargas eólicas, excepto en rascacielos de altura considerable, de manera que un modelo de flujo de aire incompresible e isotérmico proporciona soluciones razonables, simplificando considerablemente las ecuaciones a resolver, por lo que es el utilizado en los estudios llevados a cabo en el grupo. Esta premisa debe modificarse en el caso de estudios de dispersión de humo o gases calientes, en los que la estabilidad de la atmósfera tiene un rol crucial para la convección.

- **Turbulencia:** Se emplea el modelo de dos ecuaciones *k-ε Realizable*, consistente con el diseño de la malla y capaz de resolver desprendimientos de flujo en geometrías complejas. Este es un modelo de turbulencia que agrega dos ecuaciones de transporte de las variables *k* (energía cinética de la turbulencia) y *ε* (tasa de disipación de energía), a las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento del fluido.
- **Esquemas numéricos:** Se define una discretización espacial de segundo orden para los parámetros de flujo y ajuste de factores de relajación para asegurar la estabilidad del cálculo, con una tolerancia de en 10^{-4} para los residuos ponderados.
- **Entrada (Inlet):** Se define un perfil de velocidad ("velocity inlet") en las fronteras de barlovento, ajustado como un perfil de capa límite, adaptado según la rugosidad del terreno y velocidades de referencia (ej. 10 m/s o 15 nudos a alturas específicas). La presión se adaptará a la solución a partir de un valor inicial.
- **Salida (Outlet):** Condición de presión impuesta ("Pressure outlet") en las fronteras de sotavento. La velocidad del flujo se adaptará a la solución, a partir de un valor inicial.
- **Paredes:** Condición de "no-slip wall" (sin deslizamiento) en la superficie del terreno y en las paredes de los edificios. Implica que la velocidad del viento es nula sobre esas superficies.
- **Frontera superior del dominio:** El dominio de cómputo se extiende en altura hasta una distancia suficiente para permitir definir una superficie con tensiones de corte nulas sin que esto afecte los resultados a baja altura.

Paso 7: Postprocesamiento y análisis de los resultados. Etapa final para la determinación de los resultados de interés (cargas eólicas, intensidad del viento o la turbulencia local, etc.)

3. Ejemplos de aplicación:

Solamente a título ilustrativo, se mencionan dos ejemplos de aplicación de esta metodología, con objetivos muy distintos.

3.1 Estudio de vientos en el entorno de un helipuerto hospitalario

En este caso el objetivo fue estudiar el entorno eólico de un proyecto de helipuerto, situado en la ciudad de Acapulco, México, y la influencia del viento en las trayectorias de aproximación y despegue de los helicópteros sanitarios.

La ciudad de Acapulco se encuentra sobre la bahía del mismo nombre, flanqueada por cerros que superan los 800 metros de altura al norte y los 400 m al E y SE, los que influyen fuertemente el clima eólico local (Fig. 2).

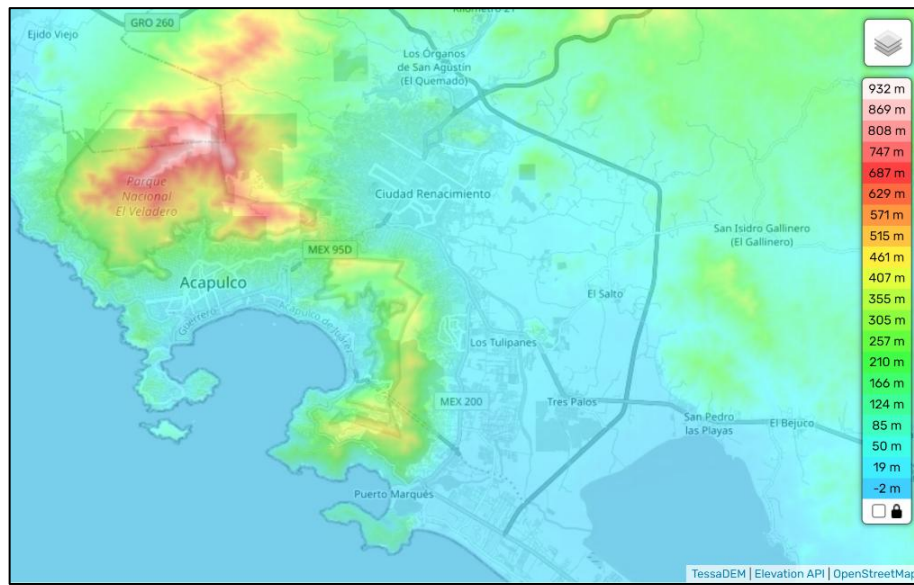


Fig. 2: Topografía de la región de Acapulco (fuente INEGI).

La Fig. 3 muestra el CAD generado mediante la metodología descrita anteriormente, a partir de información GIS. Esta fue obtenida en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (<https://www.inegi.org.mx/>), en archivos de texto que incluyen coordenadas y elevación. Debido a la complejidad de la topografía y la necesidad de analizar vientos desde múltiples direcciones, el dominio de cómputo abarcó una zona cuadrada de 18 km de lado. En la Fig. 4 se observa la malla de cómputo realizada para las simulaciones por CFD con ANSYS Fluent. Debido a las diferencias de nivel en el suelo, la frontera superior del dominio copia el relieve a una altura constante de 3000 m. La malla se densifica en las zonas de interés, como puede verse en la Fig. 5, que muestra la discretización muy fina en el entorno del hospital y el sitio proyectado de emplazamiento del helipuerto.

La metodología empleada permitió lograr muy buena resolución para condiciones de viento provenientes de ocho direcciones (N, NE, E, SE, S, SO, O y NO), con un total de 18.7 millones de elementos.

A modo de ejemplo, la Fig. 6 muestra la energía turbulenta del viento de dirección Norte, en el plano vertical que contiene la trayectoria de aproximación al helipuerto y en un plano horizontal a 30 m de altura.

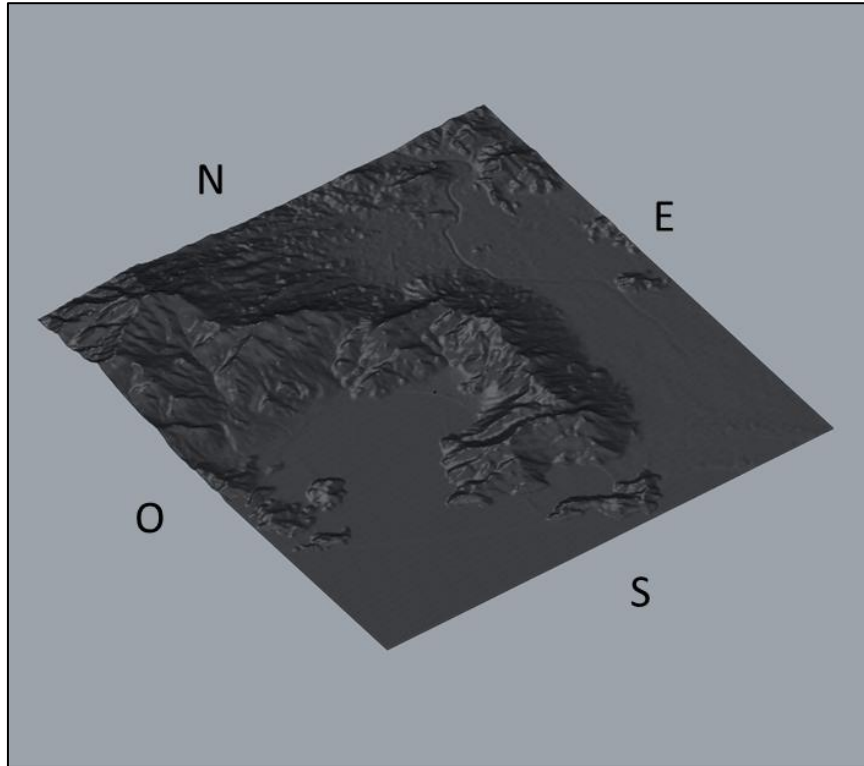


Fig. 3: CAD generado de la región de Acapulco.

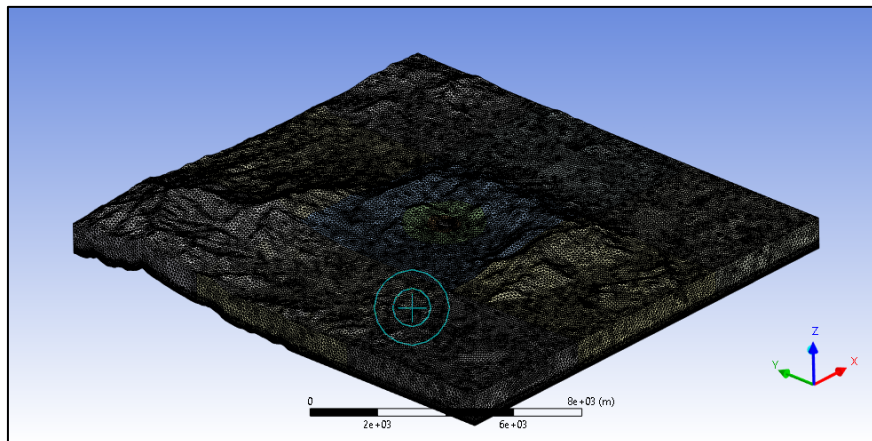


Fig. 4: Dominio de cómputo y malla para estudio de vientos en la región de Acapulco

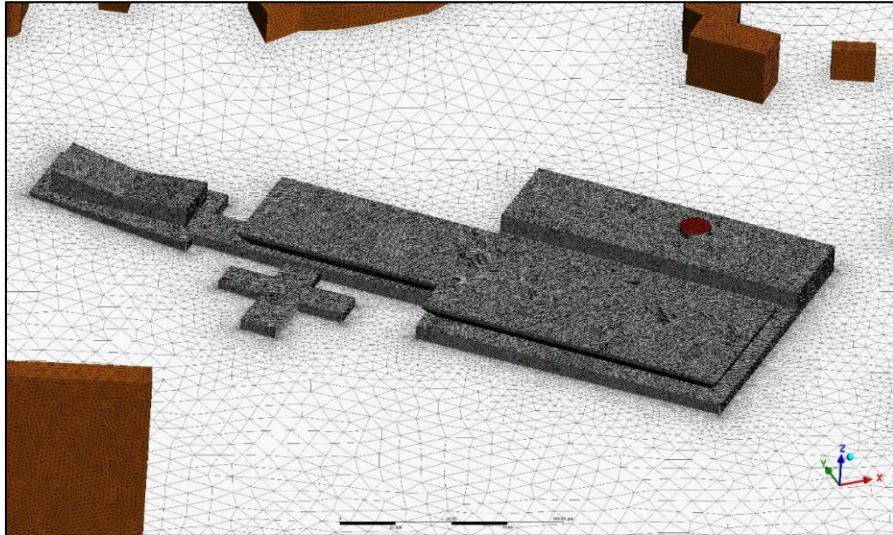


Fig. 5: Detalle de malla densificada sobre construcciones en el sitio de emplazamiento de helipuerto.

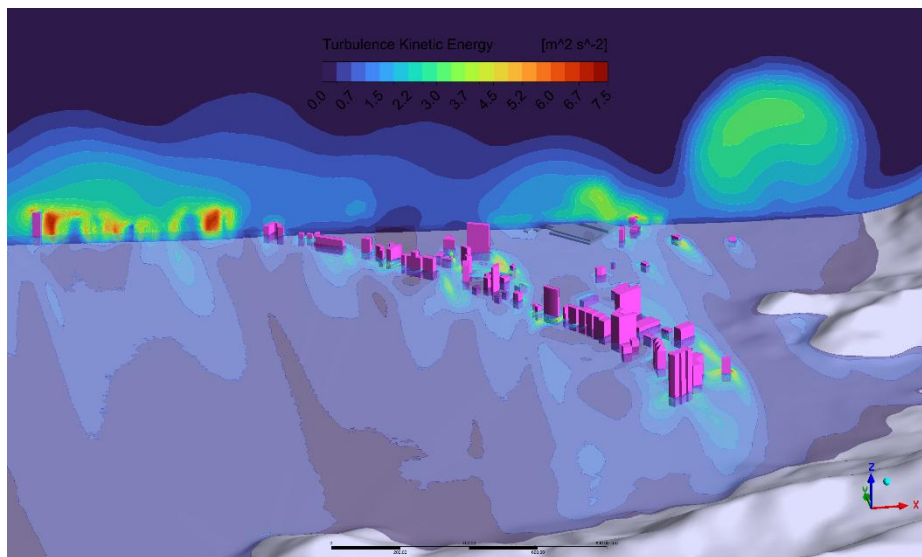


Fig. 6: Energía de la turbulencia en el plano de la trayectoria de aproximación al helipuerto y en un plano a 30 m de altura, con viento Norte.

3.2 Estudio de vientos en entorno de un proyecto edilicio en Tierra del Fuego

En este caso, la metodología se aplicó para el estudio de cargas de viento y ambiente eólico en un complejo hotelero en etapa de diseño, situado al oeste de la ciudad de Ushuaia, al pie de una ladera y sobre el Canal de Beagle. La rosa de vientos del sitio muestra una fuerte predominancia de vientos de direcciones O y SO, por lo que el estudio se realizó solamente para esas direcciones de viento incidente.

La Fig. 7, capturada en GoogleEarth, muestra la ubicación del complejo. La pendiente de la ladera sobre la que se emplazará el mismo puede visualizarse mediante el perfil de elevación mostrado en la Fig. 8. El viento predominante es canalizado y acelerado por el canal del Beagle y por la topografía en los alrededores del sitio de emplazamiento, lo que afecta sensiblemente al comportamiento local del flujo de aire.

Por último, se muestran imágenes del CAD generado en la Fig. 9 y de la porción de malla densificada en el entorno del edificio, en la Fig. 10, para el estudio detallado de los efectos del viento en la cubierta y el entorno de la edificación.



Fig. 7: Zona de estudio eólico (Imagen Google Earth).

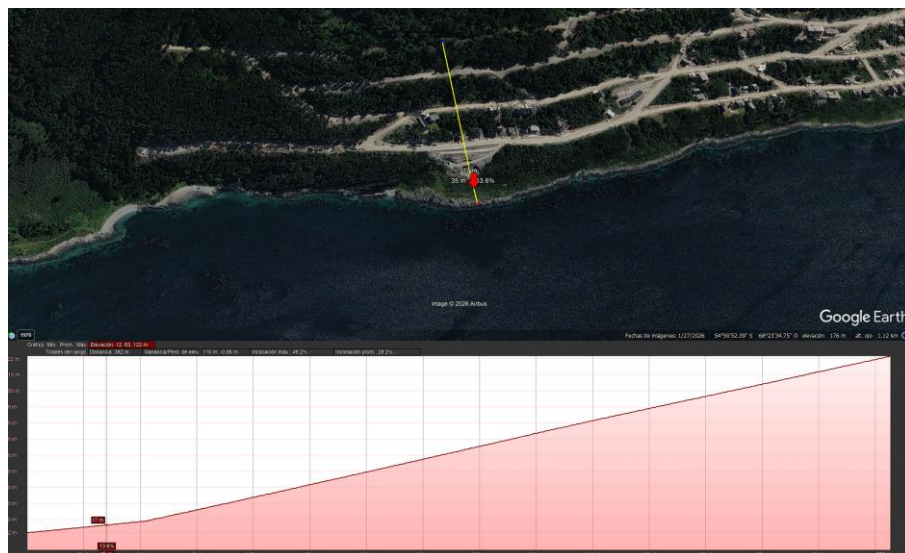


Fig. 8: Perfil de elevación de la ladera. El punto más alto de la recta marcada se encuentra a 146 metros de altura. La pendiente es 29%. (Google Earth).

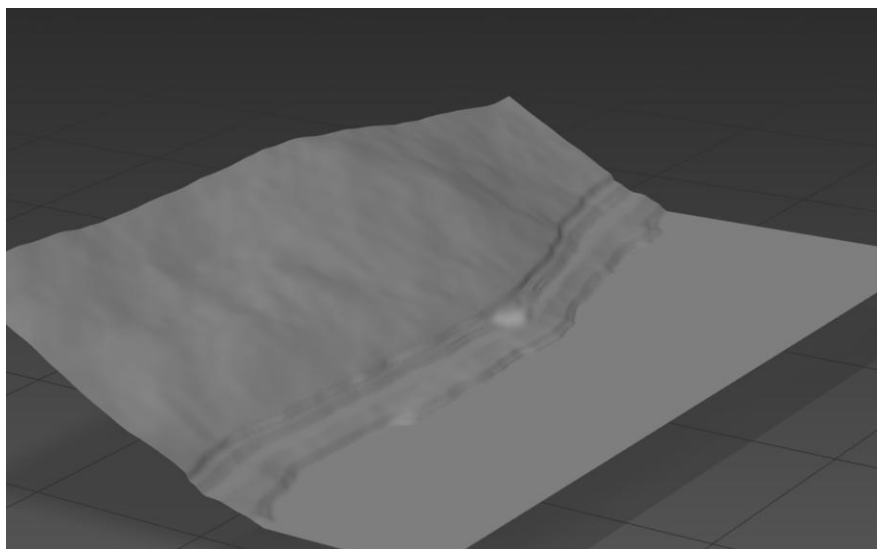


Fig. 9: CAD para el estudio de vientos

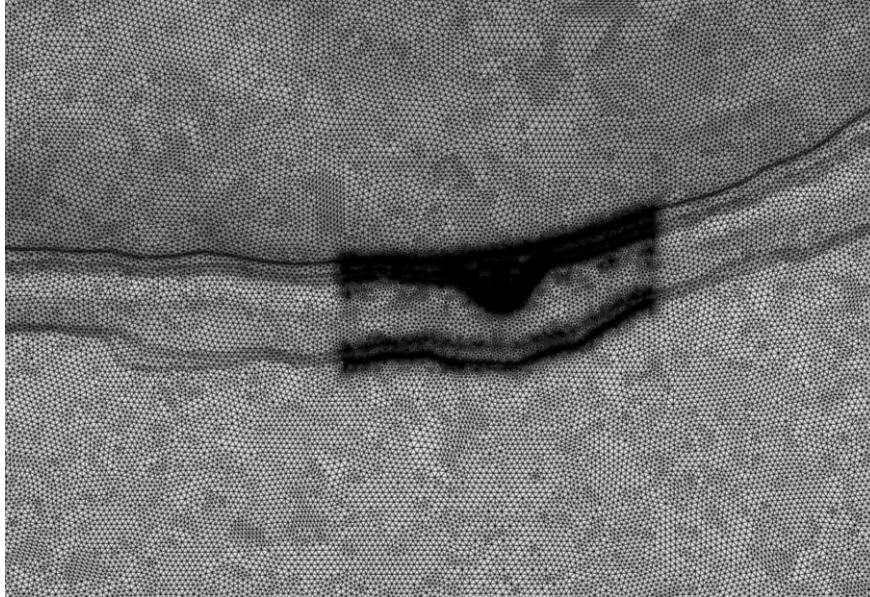


Fig. 10: Densificación de la malla de cómputo en el sitio del complejo a construir.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología para la simulación numérica del viento en entornos de topografía compleja, basada en la integración de información geoespacial de alta resolución con modelos CFD de tipo RANS. El aporte principal no está centrado en los resultados de simulaciones para los casos particulares mostrados, sino en la definición de un procedimiento de trabajo consistente, que articula de manera clara las distintas etapas del proceso: desde el tratamiento de los datos GIS hasta la construcción del dominio computacional, la generación de la malla y la selección de los modelos físicos para la configuración del cálculo numérico.

Si bien en las últimas décadas se han registrado avances significativos en la ingeniería de vientos computacional, todavía es limitada la disponibilidad de metodologías que integren de forma sistemática la complejidad geométrica real dentro de esquemas CFD aplicables en problemas de ingeniería. En muchos casos, la transición desde datos territoriales a modelos numéricos queda sujeta a decisiones poco explicitadas, lo que dificulta la reproducibilidad de los estudios.

En este sentido, la metodología propuesta establece criterios y pasos concretos para el tratamiento de la topografía, la definición de escalas relevantes y la construcción de mallas no estructuradas, junto con la implementación del modelo de turbulencia *k-ε* *realizable*. Esto permite mantener coherencia entre la representación geométrica y las hipótesis del modelo, evitando inconsistencias que suelen introducir incertidumbre en este tipo de simulaciones.

Por otra parte, el enfoque planteado no depende de una configuración específica, lo que facilita su aplicación en distintos contextos donde la topografía tiene un rol significativo. De este modo, se busca aportar una base metodológica que pueda ser utilizada y adaptada en otros estudios, tanto en el ámbito académico como en aplicaciones de ingeniería.

Los resultados de las simulaciones -no mostrados por motivos de confidencialidad-, tanto en las cargas resultantes sobre las edificaciones como en el ambiente eólico a nivel peatonal y a distintas alturas muestran una influencia considerable de la topografía circundante, la que no es tenida en cuenta, ni en los códigos de construcción (p. ej. INTI-CIRSOC 102, 2005), ni en aquellas simulaciones numéricas que postulan un entorno plano, por lo que la metodología descrita es recomendada para aquellos casos en los que la topografía impide la aplicación de estándares normalizados y dificulta un modelado físico realista en el túnel de viento.

En conjunto, el trabajo apunta a mejorar la trazabilidad y consistencia de las simulaciones numéricas del viento en terrenos complejos, contribuyendo a una práctica más sistemática y transferible dentro de la disciplina.

Referencias

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- Blocken, B., van der Hout, A., Dekker, J., & Weiler, O. (2015). CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: Case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147, 43–57.
- Boldes, U., Colman, J., & Nadal Mora, V. (1995). The Boundary Layer Wind Tunnel at the Faculty of Engineering, University of La Plata (Argentina). *Latin American Applied Research*, 25, 75–85.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Botsch, M., Kobbelt, L., Pauly, M., Alliez, P., & Lévy, B. (2010). Polygon mesh processing. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10688>
- Chan, P. W., & Hon, K. K. (2016). Observation and numerical simulation of terrain-induced windshear at the Hong Kong International Airport in a planetary boundary layer without temperature inversions. *Advances in Meteorology*, 2016, Article 1454513. <https://doi.org/10.1155/2016/1454513>.
- Chaudhari, A. (2014). *Large-eddy simulation of wind flows over complex terrains for wind energy applications* (Ph.D. thesis). Lappeenranta University of Technology.
- Dawson, P., Stock, D. E., & Lamb, B. (1991). The numerical simulation of airflow and dispersion in three-dimensional atmospheric recirculation zones. *Journal of Applied Meteorology*, 30, 1005–1024.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, K. H., & Carissimo, B. (2007). *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment* (COST Action 732).

- Han, Y., & Stoellinger, M. K. (2020). RANS simulations of neutral atmospheric boundary layer flow over complex terrain with comparisons to field measurements. *Wind Energy*, 23(2), 91–119. <https://doi.org/10.1002/we.2412>.
- International Civil Aviation Organization. (2022). Aerodromes—Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I: Aerodrome Design and Operations (9th ed.). Montréal, Canada: ICAO.
- INTI-CIRSOC. (2005). *Reglamento CIRSOC 102: Acción del viento sobre las construcciones*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LiDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards*, 61(1), 5–28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
- Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). Screened Poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 32(3), Article 29. <https://doi.org/10.1145/2487228.2487237>.
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: Principles and methodology*. CRC.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31–49. <https://doi.org/10.1177/0309133308089496>
- Maune, D. F., & Nayegandhi, A. (Eds.). (2018). *Digital elevation model technologies and applications: The DEM users manual* (3rd ed.). ASPRS.
- Ohba, R., Hara, T., Nakamura, S., Ohya, Y., & Uchida, T. (2002). Gas diffusion over an isolated hill under neutral, stable and unstable conditions. *Atmospheric Environment*, 36, 5697–5707.
- Palma, J. M. L. M., Castro, F. A., Ribeiro, L. F., Rodrigues, A. H., & Pinto, A. P. (2008). Linear and nonlinear models in wind resource assessment and wind turbine micrositeing in complex terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 2308–2326.
- Piegl, L., & Tiller, W. (1997). *The NURBS book* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59223-2>
- Potsis, T., Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2023). Computational wind engineering: 30 years of research progress in building structures and environment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 234, 105346. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105346>
- Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
- Stathopoulos, T. (1997). Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67–68, 509–532. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00097-4)
- Thompson, J. F., Soni, B. K., & Weatherill, N. P. (1999). *Handbook of grid generation*. CRC Press.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1613–1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>.
- Troen, I., & Petersen, E. L. (1989). *European Wind Atlas*. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory. ISBN 87-550-1482-8.
- Tse, L. K. S., Guan, Y., & Li, L. K. B. (2021). RANS simulations of terrain-disrupted turbulent airflow at Hong Kong International Airport. *Computers & Mathematics with Applications*, 81, 737–758. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.03.034>.