

(05-030) - Air Flows Patterns in Urban Canyons: Applications for Outdoor Climate Control

Ruda Sarria, Francisco ¹; Palomo Amores, Teresa ¹; Monge Palma, Rafael ¹;
ROMERO GARCÍA, CRISTIAN ¹; Guerrero Delgado, Mcarmen ¹

¹ Universidad de Sevilla

The rise in urban temperatures due to the urban overheating phenomenon threatens the quality of life of the population, harming health and reducing outdoor social life. To counter this trend, the scientific community has developed methods of acclimatization in open spaces. Therefore, understanding the movement of air in urban canyons is crucial for developing efficient acclimatization methods in these areas. This study uses computational fluid dynamics (CFD) simulations to characterize the airflow in these environments, offering quick and reliable results. Furthermore, a low computational cost numerical model is presented, providing qualitative and quantitative data on air renewal in different urban contexts, offering quality solutions. The study analyzes two specific cases, focusing on factors such as the width-height aspect ratio of the streets and wind speed. It concludes that air renewal decreases with a higher aspect ratio, and that the airflow in narrow streets is significantly influenced by wind speed. These findings are vital for urban planning in the field of climate control, improving wellbeing in urban outdoor spaces.

Keywords: Urban Overheating; Street Canyon; Ventilation; Climate Control

Comportamiento de Flujos de Aire en Cañones Urbanos: Aplicaciones para el Control Climático Exterior

El aumento de las temperaturas en las ciudades debido al fenómeno de sobrecalentamiento urbano amenaza la calidad de vida de la población, perjudicando la salud y reduciendo la vida social al aire libre. Para contrarrestar esta tendencia, la comunidad científica ha desarrollado métodos de aclimatación en espacios abiertos. Por ello, comprender el movimiento del aire en cañones urbanos es crucial para desarrollar métodos de aclimatación eficientes en espacios abiertos. Este estudio utiliza simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para caracterizar el flujo de aire en estos entornos, ofreciendo resultados rápidos y fiables. Además, se presenta un modelo numérico de bajo coste computacional, que proporciona datos cualitativos y cuantitativos sobre la renovación del aire en diferentes contextos urbanos, ofreciendo soluciones de calidad. El estudio analiza dos casos específicos, enfocándose en factores como la relación de aspecto anchura-altura de las calles y la velocidad del viento. Se concluye que la renovación del aire disminuye con una mayor relación de aspecto, y que el flujo de aire en calles estrechas se ve notablemente influenciado por la velocidad del viento. Estos hallazgos son vitales para la planificación urbana en el ámbito del control climático, mejorando el bienestar en espacios exteriores urbanos.

Palabras clave: Sobrecalentamiento urbano; Cañón Urbano; Ventilación; Control climático.

Correspondencia: cromero3@us.es

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por los proyectos "CONSTANCY- Metodologías de urbanización resiliente y acondicionamiento natural mediante



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

soluciones basadas en la naturaleza y el patrimonio cultural para recuperar la vida en la calle" (PID2020-118972RB-I00) y el proyecto "NATURBEAM- Iluminando el camino hacia un futuro más verde para restaurar la habitabilidad urbana a través de soluciones basadas en la naturaleza" (TED2021-130416B-I00) por el Ministerio Español de Ciencia, Innovación y Universidades.

El primer autor está financiado con una subvención pública para el desarrollo del «Programa INVESTIGO» (Actividad: C23.I1.P03.S01.01 ANDALUCÍA), financiada con cargo a los fondos procedentes del «Mecanismo de Recuperación y Resiliencia».

El tercer autor está financiado por el Ministerio Español de Ciencia, Innovación y Universidades mediante una beca doctoral FPU21/02611.

1. Introducción

Hoy en día el estudio del cambio en el clima urbano ha captado la atención de gran parte de la comunidad científica debido a su efecto (generalmente negativo) en la calidad de vida de todos los habitantes. Entre los fenómenos perjudiciales que se han desarrollado, el sobrecalentamiento urbano eleva las temperaturas alrededor de las ciudades hasta 8°C por encima del promedio en las áreas rurales circundantes (Oke, 1982; L. Yang et al., 2016). Para desarrollar estrategias que busquen proteger a los ciudadanos del calor extremo en espacios públicos en las ciudades, es vital recopilar más información sobre el patrón de flujo que describe el aire en la trama urbana, con principal énfasis en el interior de las calles, que son uno de los principales mecanismos de ventilación en las áreas urbanas y donde se concentra la vida social.

Este estudio implica el uso de varios parámetros para clasificar los casos investigados. Los más importantes son la relación entre la altura y el ancho de la calle (AR) y el número de Reynolds (Re). El primero da una idea de su estrechez (Hang & Chen, 2022; Karimimoshaver et al., 2021), mientras que el número de Reynolds representa el comportamiento turbulento del flujo. Ambos parámetros son cruciales porque determinan de forma completa el patrón de flujo, así como el número y la posición de los vórtices dentro de la calle (Saqr et al., 2012).

Dentro de los estudios que se han realizado de este tema hay una notable falta de información relacionada con la cuantificación y evaluación de la tasa de flujo de masa de aire en la calle, a lo que este documento pretende abordar. La obtención de estos resultados es crucial para poder cuantificar la renovación del aire dentro de la calle y así poder diseñar efectivamente estrategias de aclimatación en exteriores, sabiendo cuanto aire exterior entra (útil para establecer balances de energía y obtener el calor que se disipa) así como la posición de recirculaciones de aire que explican la diferencia notable de temperaturas dentro de una misma calle.

Estos resultados se obtendrán simulando en Fluent CFD un modelo de calle de altura $H=10\text{m}$, que representa un edificio típico de tres. Además, se ha desarrollado un método innovador para distinguir la proporción de flujo de aire que entra desde el exterior y el aire impulsado desde el propio vórtice de la calle, que no es aire renovado y por tanto no es interesante.

Para este propósito, se realiza una breve caracterización de la configuración general para Fluent y luego se llevan a cabo dos estudios para ver cómo afectan ambos parámetros. Primero, se fija un Re, y se cambia la relación de aspecto en un rango de $AR=0.75-4$ para dar pie a diferentes morfologías de calles. Luego, se prueba la influencia del número de Reynolds, variándolo desde $1\text{e}5$ hasta $2.7\text{e}6$ fijando de la relación de aspecto de la calle (H. Yang et al., 2021). La modificación de este parámetro se puede conseguir alterando la altura del edificio (H) o la velocidad de referencia del aire (V_{ref}). En concreto, este rango de Reynolds equivaldría a fijar la altura del edificio de la calle a estudiar en $H=10\text{m}$ y variar la velocidad de referencia del aire desde una muy baja (0.15m/s) hasta alta (4m/s). Sin embargo, también se podría obtener fijando la velocidad del aire y modificando la altura del edificio, lo cuál dota de gran versatilidad e importancia a este estudio, pues amplía los resultados a muchos más casos (edificios de distintas alturas o con diferentes condiciones de aire exterior).

Con esto, se puede realizar una especie de catálogo en el que se recoge los resultados de ventilación y los patrones de corriente de la calle en relación con los parámetros mencionados anteriormente. Esta es información muy valiosa que resulta vital a la hora de diseñar estrategias para la adaptación de las ciudades al cambio climático.

2. Metodología

Para lograr los objetivos descritos anteriormente, es necesario definir todos los parámetros que intervienen en el estudio de este fenómeno. El primer paso es discutir la configuración de Fluent y determinar el conjunto de opciones más apropiado entre todas las posibilidades que este proporciona, lo cual tiene un gran impacto en la calidad de los resultados obtenidos, incluida la configuración del dominio numérico y la malla. Una vez hecho esto, se definen los resultados que se han obtenido en todos los casos, los cuales están relacionados con el patrón de flujo dentro de la calle y los valores numéricos de ventilación.

2.1 Dominio numérico

Realizar estudios e investigaciones utilizando simulaciones de CFD implica elegir una serie de parámetros que afectan directamente la obtención de un resultado que se asemeje a la realidad. El software de CFD elegido en esta investigación es Fluent (*Ansys Fluent | Fluid Simulation Software*, n.d.), ampliamente usado en la comunidad científica debido a su alta capacidad de cálculo y versatilidad. Para resolver la naturaleza turbulenta del problema, se han seleccionado el conjunto de las ecuaciones RANS, más específicamente el modelo de cierre k- ϵ RNG porque, de acuerdo con la literatura científica del tema (Li et al., 2005), este modelo ha demostrado ser el que proporciona resultados más semejantes a los experimentales para estos problemas específicos.

En cuanto al resto de la configuración del entorno de Fluent, se ha elegido el método SIMPLE para resolver las ecuaciones acopladas de presión y velocidad, utilizando el modelo “Least squares cell based” para el cálculo del gradiente. Además, se utiliza una discretización de segundo orden para el resto de las magnitudes para lograr una mayor precisión, utilizando la inicialización híbrida del problema para iniciar la simulación. En este caso, como criterio de convergencia se establece el valor de todas las magnitudes residuales (diferencia entre las ecuaciones en un paso de simulación y el anterior) en $1e-5$, lo suficientemente bajo como para considerar el resultado como convergido.

Por otro lado, un modelo geométrico de calidad es muy importante para resolver el problema CFD en cuestión. Tradicionalmente se ha usado el modelo de depresiones sucesivas para inducir cierta rugosidad en la región de entrada a la depresión objetivo, así como para aumentar la turbulencia del fluido (Xie et al., 2006). Sin embargo, si bien esto es una buena manera de hacerlo en el mundo de la investigación, generalmente debido al gran tamaño del dominio numérico se consume mucho coste computacional a la par que tiempo en completar las simulaciones, lo que lo convierte en un método no práctico para estudios en los que se desean resultados para posteriores aplicaciones ingenieriles. Por lo tanto, es deseable contar con un modelo mejorado que sea fácil de replicar y computacionalmente eficiente.

Esto se ha logrado modelando la rugosidad del problema a través de un parámetro llamado rugosidad aerodinámica (z_0), que es un valor empírico obtenido de algunos autores (Blocken, 2015) que tratan de asignar a paisajes típicos de los entornos urbanos un valor numérico de rugosidad estandarizada útil en desarrollos matemáticos y en el modelado de estos paisajes para distintas aplicaciones. Con este parámetro, se utiliza una expresión matemática para modelar el perfil de velocidad de entrada para simular el perfil de la capa límite urbana (UBL) y la turbulencia (Oke et al., 2017). El dominio numérico mejorado se muestra en la Figura 1, al igual que las condiciones de contorno a introducir en Fluent en la Tabla 1.

Figura 1: Dominio numérico con medidas

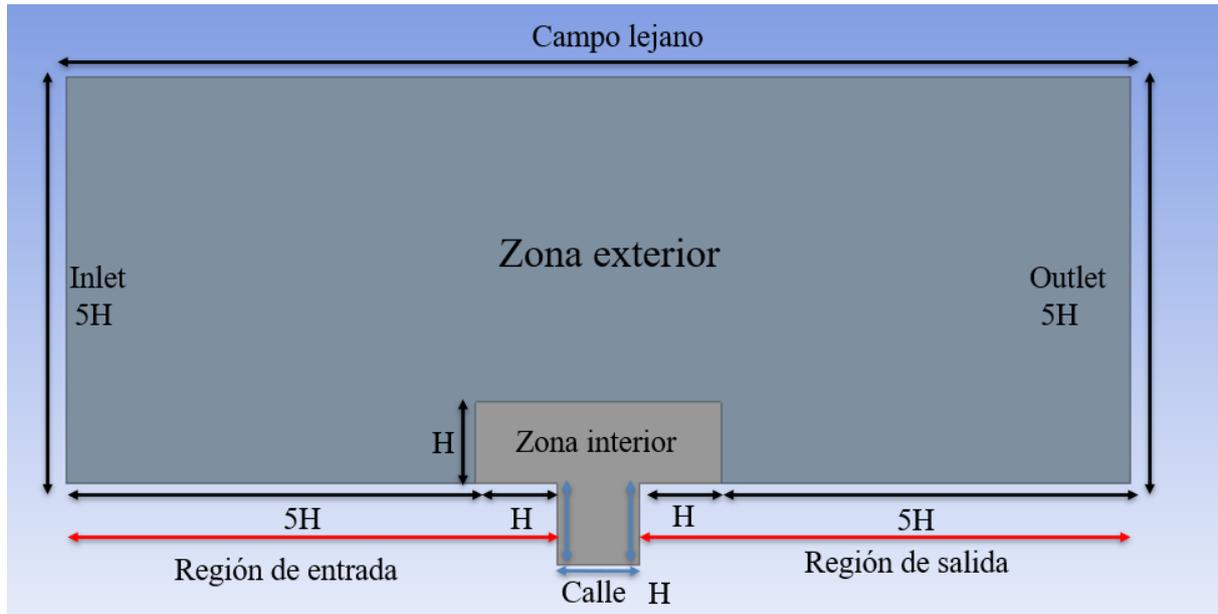


Tabla 1: Condiciones de contorno del problema

Zona	Condición de contorno
Inlet	Velocity inlet x -Velocity $U = V_{ref} \left(\frac{y}{H}\right)^{0.16}$
Outlet	Pressure Outlet
Campo lejano	Symmetry
Región de entrada	Wall. Roughness, $z_0=0.1m$
Región de salida	Wall, no slip condition
Calle	Wall, no slip condition

Finalmente, la definición de la malla en el dominio tiene un papel vital en las simulaciones de CFD, ya que los resultados dependen en gran medida de la calidad de la malla (Sukri & Ali, 2016). En este documento se han utilizado diferentes estrategias para refinar la solución:

- Malla estructurada con celdas tetraédricas.
- El tamaño de la celda depende de la altura de referencia y AR. Esto significa que el tamaño de la celda es proporcional a la escala del modelo, evitando un crecimiento excesivo.
- El dominio numérico se divide en dos áreas. La "zona interna" está relacionada con el interior de la calle y el área circundante. Aquí, el tamaño de la celda de la malla es más fino porque es dónde se necesita mayor precisión para obtener buenos resultados, con un tamaño de celda de $H/(100 \cdot AR)$. Por otro lado, la "zona externa" es el resto del dominio, donde la malla es más gruesa con un tamaño de celda de $H/20$.

2.2 Indicadores

Varios parámetros influyen significativamente en este tipo de simulación, siendo el más importante para caracterizar este fenómeno la relación de aspecto de la calle, expresada como $AR=H/W$, donde H es la altura de la calle y W es su anchura. Según esta definición, las calles con AR bajo representan calles anchas o avenidas, mientras que un AR alto indica calles estrechas típicamente encontradas en áreas altamente urbanizadas. Su principal efecto en el flujo es modificar la cantidad de aire que entra en la depresión, así como el número de vórtices que se originan y su posición. Como se mencionó anteriormente, Re es el otro parámetro principal relacionado con este tema. Investigaciones recientes sobre este fenómeno han demostrado que Re afecta en gran medida el patrón de flujo, principalmente alterando el número y la posición de los vórtices para un AR fijo (Chew et al., 2018). Esto implica que se debe realizar un estudio de Re para caracterizar completamente el flujo dentro de una calle y no solo restringirse a modificar el A.

El primer indicador extraído de todas las simulaciones es el patrón de líneas de corriente dentro del cañón urbano, que representa el movimiento del aire en su interior, ayudando a identificar la recirculación del aire y sus centros. El otro indicador común a todos los casos estudiados es caudal de masa de aire o renovación de aire (ACH) en unidades de kg/s, que representa la cantidad de aire que entra en la calle. La información sobre este resultado es bastante escasa en la literatura científica, por lo que este documento se centrará en ello suplir esa escasez. Debido a la naturaleza discreta bidimensional de los cálculos de CFD, la expresión para ACH está en la ecuación (1).

$$ACH = 1[m] \cdot \rho \sum_{k=0}^{k=N} \Delta \bar{w}_{k_{entrada}} \cdot \Delta x_k \quad (1)$$

Aquí, 1m es la profundidad virtual que usa Fluent en simulaciones 2D, Δx_k es el tamaño de la celda k situada en la línea de entrada de la calle (es decir, la distancia entre dos nodos consecutivos), ρ es la densidad del fluido y $\Delta \bar{w}_{k_{entrada}}$ es la velocidad vertical media entre dos todos adyacentes de una celda. A pesar de todas las limitaciones y errores inherentes de la discretización y naturaleza 2D del problema, esa ecuación presenta buenos resultados.

Además, a partir de este indicador se pueden conseguir otros de gran utilidad cambiando sus unidades. En primer lugar, se puede adimensionalizar el resultado para quitar su dependencia con la velocidad del fluido exterior y su escala. Esto se llama ventilación adimensional (ACH_{ad}) y su expresión está en la ecuación (2).

$$ACH_{ad} = \frac{ACH}{1[m] \cdot \rho \cdot (H/AR) \cdot V_{ref}} \quad (2)$$

Otra magnitud interesante es la renovación horaria de aire en el interior de la calle, muy importante para el diseño de estrategias de climatización. Se usa como una aproximación del número de veces que el aire en el interior de una zona se renueva completamente en un periodo dado de tiempo (1h). Se nombra como ren/h y su expresión está en la ecuación (3).

$$ren/h = \frac{ACH \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{\rho \cdot A \cdot 1[m]} \quad (3)$$

Donde A es el área encerrada por la calle. Debido a la naturaleza bidimensional del problema, se puede obtener como $A = H/W$.

El último indicador de interés es el caudal de aire equivalente (ACH_{eq}). Éste proporciona una medida de la porción de aire que entra dentro de la calle directamente desde el exterior (y por tanto a la misma temperatura que el aire exterior) y no desde la misma recirculación de aire. Se define como la cantidad de aire a la misma temperatura que el flujo exterior que satisface la ecuación (4). Es un indicador de calidad ya que mide la renovación de aire efectiva de la calle.

$$ACH_{eq}(kg/s) = 1[m] \cdot \rho \frac{\sum_0^{k=N} \Delta \bar{w}_{k \text{ entrada}} \cdot \Delta x_k \cdot (\bar{T}_k - T_{area})}{T_{ext} - T_{area}} \quad (4)$$

Donde T_k es la temperatura media del aire en la celda k y T_{area} es la temperatura media del aire en la calle. Gran parte de la innovación de este trabajo reside en obtener todos estos indicadores para la gran batería de casos que se van a estudiar.

3. Resultados y discusión

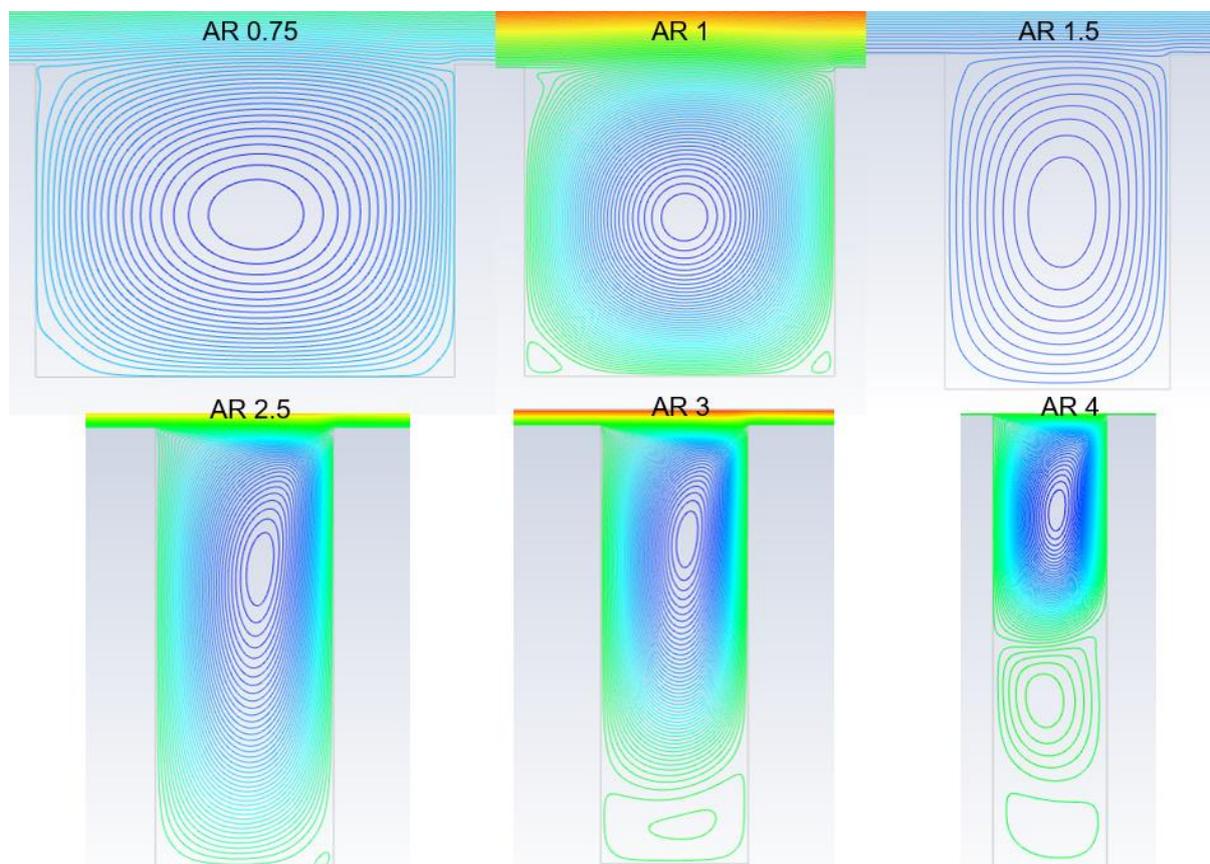
3.1 Estudio caracterización AR

El primer estudio de este documento es una caracterización según AR, que proporcionará información útil sobre la ventilación del aire para diferentes morfologías de calles (Hang et al., 2020). Tanto la altura de los edificios como la velocidad del viento se fijan en $H=10m$ y $V_{ref}=1m/s$ ($Re=6.7e5$). Entonces, el parámetro AR se varía en un rango de 0.75 a 4. El primer indicador de interés es el patrón de líneas de corriente del flujo, que se representa para algunos AR (los casos más interesantes) en la Figura 2 y el número y posición de los vórtices en la Tabla 2. Para AR bajos y medios (hasta $AR=1.5$) hay un solo vórtice en el centro de la calle. Luego, desde $AR=2$ hasta $AR=2.5$, el centro del vórtice se mueve hacia el techo, lo que puede ser causado por la dificultad del flujo para llegar al fondo cuando AR aumenta. Finalmente, para calles estrechas ($AR>3$) se forman múltiples recirculaciones de aire. En primer lugar, el tamaño del vórtice inferior es muy pequeño en comparación con el otro y su centro está muy cerca del suelo. Sin embargo, al aumentar AR, su tamaño crece y su centro se desplaza hacia arriba mientras que el centro del vórtice superior permanece fijo. Finalmente, para $AR=4$ se forma un nuevo vórtice en la parte más inferior. Este resultado es fundamental para comprender el movimiento del aire dentro de los cañones de calle porque permite dividirlos según sus recirculaciones.

Tabla 2: Posición de las recirculaciones para Re fijo

AR	Centro de las recirculaciones (x/W,y/H)
0.75	Aproximadamente en el centroide de la calle
1	Aproximadamente en el centroide de la calle
1.5	Aproximadamente en el centroide de la calle
2.5	Única ~ (0.6,0.3)
3	Superior ~ (0.6,0.3) Inferior ~ (0.6,0.8)
4	Superior ~ (0.6,0.2) Intermedia ~ (0.5,0.8) Inferior ~ (0.5,0.95)

Figura 2: Patrones de flujo según AR para Re fijo



Lo siguiente a comparar son los resultados de ventilación de cada caso (Tabla 3). Empezando por el caudal de aire total (ACH) se puede ver en la tabla como hay una tendencia global, el caudal se reduce a medida que se aumenta el AR, acorde a lo que otros autores obtuvieron de forma cualitativa (Chung & Liu, 2013). Al principio hasta $AR=1.75$ el caudal desciende más rápidamente de forma que se reduce en un orden de magnitud entre $AR=0.75$ y $AR=1.75$. Sin embargo, a partir de ese caso la tendencia cambia y la reducción de caudal se suaviza de forma que para $AR>1.75$ el orden de magnitud es el mismo, reduciéndose desde 0.02kg/s hasta 0.01kg/s aproximadamente. Como se ve, esto implica un estancamiento en la renovación de aire dentro de la presión en calles estrechas, pues provoca en la práctica que el aire que entra en calles estrechas de la misma altura es aproximadamente independientemente de su ancho, siempre y cuando $AR>2$.

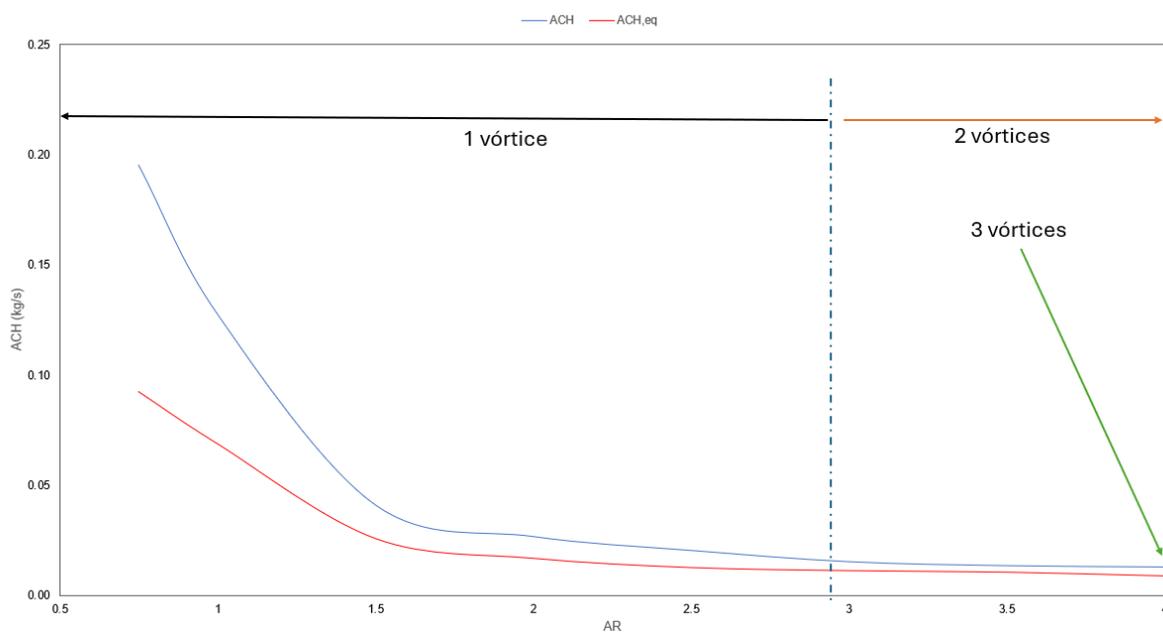
Tabla 3: Resultados de ventilación según AR para Re fijo

AR	ACH total (kg/s)	ACH eq (kg/s)	ACH,ad total	ACH,ad eq	Ren/h	Ren/h eq
0.75	0.188	0.096	0.0115	0.0059	4.13	2.12
1	0.118	0.063	0.0097	0.0052	3.42	1.87
1.5	0.041	0.022	0.005	0.0034	1.83	1.23
2	0.023	0.016	0.0039	0.0027	1.4	0.95

2.5	0.018	0.013	0.0039	0.0028	1.39	1
3	0.015	0.010	0.0038	0.0027	1.36	0.97
3.5	0.013	0.009	0.0038	0.0027	1.36	0.97
4	0.011	0.008	0.0038	0.0028	1.36	1.01

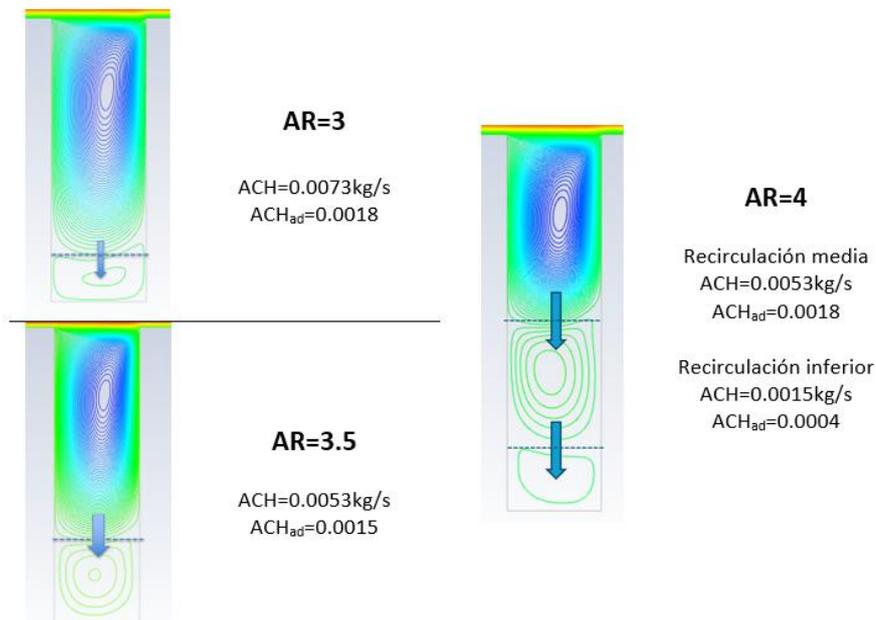
En cuanto al caudal equivalente, se puede ver cómo queda reducido a aproximadamente la mitad del valor del caudal total para relaciones de aspecto bajas y medias, lo que significa que aproximadamente la mitad del aire que se introduce en la depresión proviene del mismo efecto de la recirculación de esta, renovándose solo con aire exterior la mitad del aire total. Sin embargo, para relaciones de aspectos altas se puede ver como el caudal equivalente es aproximadamente el 75% del total, lo que significa que en calles estrechas entra proporcionalmente más aire del exterior que en calles más anchas, aunque en valores netos sea menor. Esto puede verse representado en la Figura 3, pues se ve perfectamente como para AR bajos hasta 1.25 la diferencia entre caudal total y equivalente es mayor que para AR altos. Cabe mencionar la similitud en cuanto a tendencia con respecto al caudal total, pues este disminuye conforme nos desplazamos a AR mayores, primero de forma más rápida y después la reducción se suaviza para calles estrechas.

Figura 3: Evolución del ACH (kg/s) respecto a AR para $V_{ref}=1\text{m/s}$



Además, en los casos en los que se forman más de una recirculación se puede fragmentar el campo fluido dentro de la depresión tomando como referencia el volumen ocupado por cada recirculación. Esto es de utilidad puesto que también se puede obtener el aire que entra dentro de cada uno de estos subvolúmenes aplicando la misma expresión que para los casos anteriores, pero esta vez integrando sobre la línea de entrada al respectivo subvolumen (Figura 4).

Figura 4: Ventilación entre subvolumenes



3.2 Estudio caracterización Re

En este estudio se han tomado tres modelos de calles con AR distintos representativos de distintas morfologías, para así ampliar abanico de casos a estudiar. En primer lugar, los resultados para $AR=0.75$ nos darán información para los casos en los que el ancho de la calle sea poco mayor que el alto; el caso de $AR=1.5$ nos dará información del caso contrario y por último el caso para $AR=3$ nos dará información de calles muy estrechas en los que su altura es mucho mayor que su anchura. En cada situación se hará variar el número de Reynolds dentro de un determinado rango, desde $1.01e5$ hasta $2.70e6$. Como ya se ha mencionado, esto equivale a fijar la altura del edificio en $H=10m$ y variar la velocidad de referencia desde $0.15m/s$ hasta $4m/s$, valores que representan valores convencionales de la velocidad típica del aire dentro de entornos urbanos, pues carecería de utilidad simular valores de velocidad muy altos ya que proporcionarían valores no útiles para proyectos de acondicionamiento climático. De cada caso se obtendrán los valores numéricos de ventilación y los patrones de líneas de corriente y se sacarán las conclusiones correspondientes en cuanto a tendencias del comportamiento de los indicadores.

Al analizar los resultados para los casos de $AR=0.75$ y $AR=1.5$ se puede comprobar que ambos tienen la misma tendencia. Para todo el rango de velocidades de aire estudiado se puede ver como se forma una única recirculación en el centroide de la depresión. El aumento de velocidad de aire el único efecto que tiene en el patrón de líneas de corriente es el de suavizar y eliminar las recirculaciones de esquina, que empiezan siendo apreciables para velocidades bajas hasta que al final acaban desapareciendo.

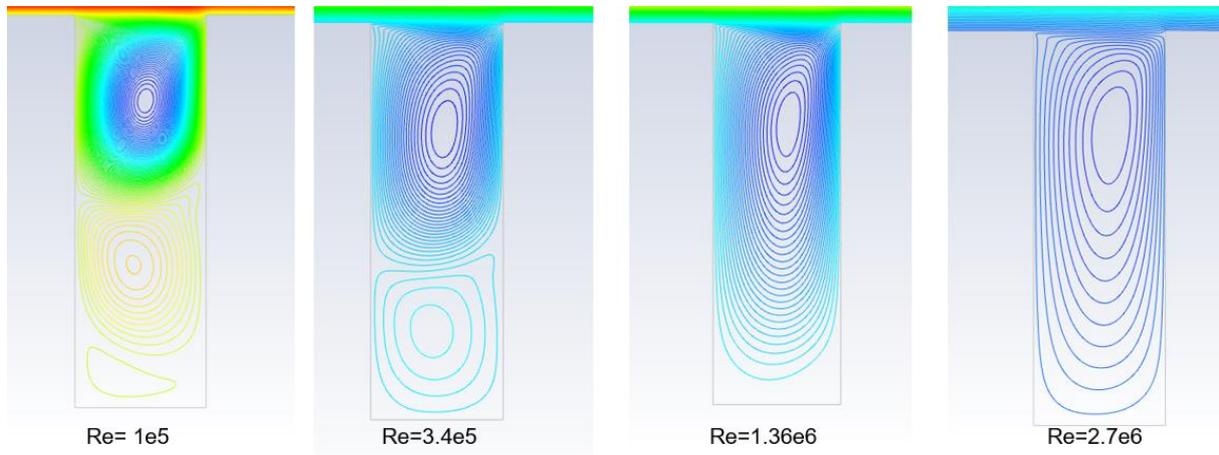
Por otro lado, los resultados para el caso de $AR=3$ refleja que el comportamiento de las calles estrechas muestra una tendencia diferente (Figura 5). Es fácil ver como el patrón de líneas de corriente varía a medida que aumenta la velocidad. Al principio para velocidades bajas se forman varias recirculaciones, tres para velocidades muy bajas y posteriormente dos. Sin embargo, cuando la velocidad aumenta, el vórtice inferior va disminuyendo su tamaño desplazándose su centro hacia el extremo inferior mientras que el centro de la recirculación superior se mantiene fija (Tabla 4). Esto sigue sucediendo hasta cierta velocidad entre 1 y 2 m/s en la cual la recirculación inferior desaparece y se tiene que se forma un único vórtice

dentro de la depresión, con el centro por encima de la línea media de la misma que se ha mantenido invariable.

Tabla 4: Centros de la recirculación según Re para AR=3

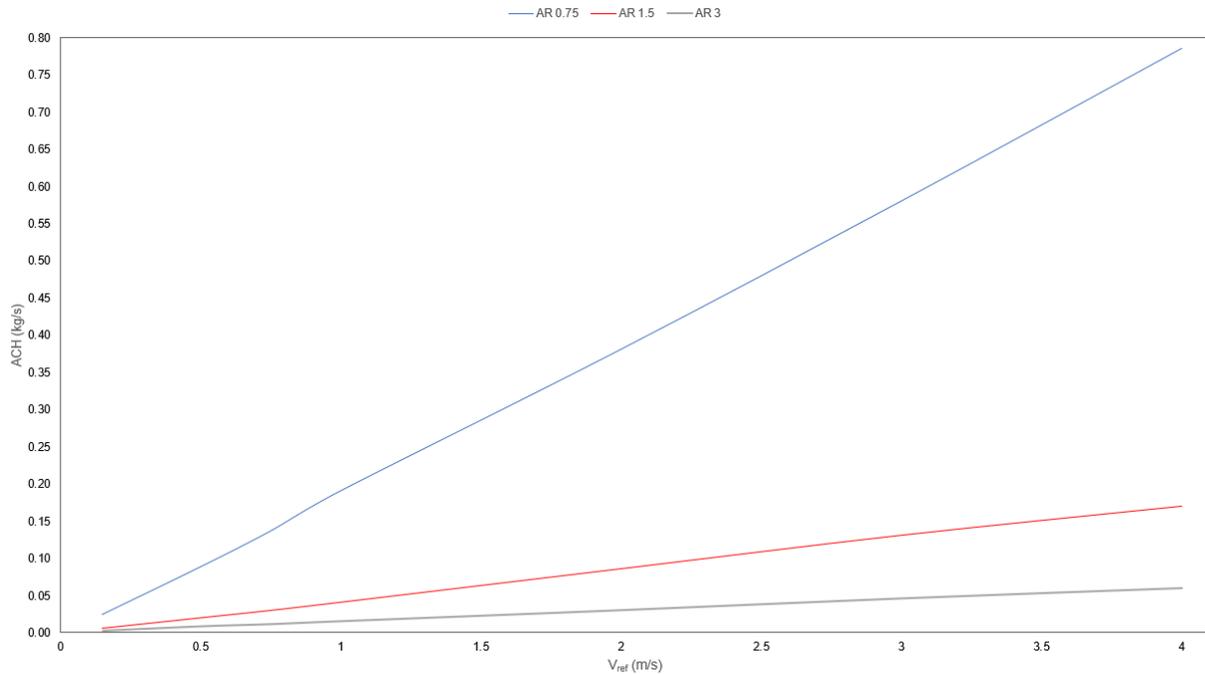
$Re=1.01e5$	$Re=3.40e5$
Superior ~ (0.5,0.2)	Superior ~ (0.6,0.3)
Intermedio ~ (0.5,0.6)	Inferior ~ (0.5,0.8)
Inferior ~ (0.3,0.9)	
$Re=1.36e6$	$Re=2.70e6$
Única ~ (0.6,0.3)	Única ~ (0.6,0.3)

Figura 5: Patrones de corriente según Re para AR=3



Por otro lado, los resultados en la ventilación se pueden agrupar para los tres casos puesto que comparten la misma tendencia. Se puede ver como al aumentar la velocidad aumenta el caudal de entrada de forma lineal (Figura 6); mientras que si se adimensionaliza se puede observar cómo su variación con la velocidad es mínima, manteniéndose aproximadamente constante el valor del ACH adimensional, lo que significa que en una primera estimación se podría calcular el caudal de entrada directamente como el producto del caudal de entrada para una velocidad de referencia de 1m/s multiplicado por la velocidad deseada, lo que ahorraría tiempo al no tener que hacer distintas simulaciones para otros rangos de velocidades.

Figura 6: Evolución del ACH (kg/s) según Vref para H=10



4. Conclusión

A continuación, un resumen de todo lo obtenido en este documento se desarrollará. En primer lugar, la caracterización según AR ha proporcionado mucha información útil, ya que la representación de los patrones de líneas de corriente para cada caso ha facilitado la identificación del número y posición de los vórtices formados. Se observa un comportamiento diferente dependiendo de la estrechez de la calle, con solo un vórtice para $AR \approx 1$. Sin embargo, en calles estrechas (aproximadamente para $AR > 1.75$) comienza un nuevo proceso de formación de vórtices, desplazando el existente hacia la parte superior y finalmente se produce un régimen de múltiples vórtices para $AR > 3$. Además, los resultados numéricos de ventilación proporcionan un valor ilustrativo de ACH para cada configuración de calle, bien diferenciado en dos tendencias: para $0.75 < AR < 1.75$, el caudal de aire entrante disminuye rápidamente con AR, aproximadamente en un orden de magnitud, pero para $AR > 1.75$ se produce un estancamiento de la ventilación, y la variación de ACH es mucho más suave que antes. Esto significa que la renovación de aire en calles estrechas es mucho menor que en calles anchas. Además, la definición de la tasa de flujo de masa de aire equivalente ha permitido hacer una distinción entre el flujo de aire debido al vórtice mismo y al exterior, lo cual es extremadamente importante porque la temperatura del aire de la recirculación es similar a la que se encuentra dentro de la depresión, por lo que ese aire resulta inútil al diseñar estrategias para enfriar un espacio exterior.

Por otro lado, mediante la variación del Re se ha podido determinar la dependencia de la ventilación del aire con la velocidad del viento. Se ha demostrado que la relación entre ambos es casi lineal para cada AR probado, lo que facilita escalar los resultados a cualquier velocidad de viento de interés. Respecto al patrón de líneas de corriente, para calles con AR bajo y medio, este permanece inalterado en el rango estudiado, solo se observa un ligero suavizado de los vórtices de las esquinas. Sin embargo, para calles con AR alto, el número y posición de las recirculaciones dependen en gran medida de la velocidad del viento.

En resumen, este artículo proporciona información valiosa sobre la ventilación del aire y los patrones de líneas de corriente dentro de los cañones urbanos para una amplia gama de casos. No solo se han estudiado diferentes morfologías, sino también para un tipo de calle fijo, la variación de sus resultados de ventilación al cambiar las condiciones de velocidad del viento. Estos resultados ahora pueden ser utilizados en diferentes proyectos reales relacionados con la aclimatación de espacios exteriores, ya que se ha proporcionado un extenso catálogo de resultados de ventilación para una gran variedad de morfologías de calle y condiciones exteriores de viento.

Ansys Fluent | Fluid Simulation Software. (n.d.). Retrieved October 16, 2023, from <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

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>

Chew, L. W., Aliabadi, A. A., & Norford, L. K. (2018). Flows across high aspect ratio street canyons: Reynolds number independence revisited. *Environmental Fluid Mechanics*, 18(5), 1275–1291. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9601-0>

Chung, T. N. H., & Liu, C. H. (2013). On the Mechanism of Air Pollutant Removal in Two-Dimensional Idealized Street Canyons: A Large-Eddy Simulation Approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 148(1), 241–253. <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9811-4>

Hang, J., & Chen, G. (2022). Experimental study of urban microclimate on scaled street canyons with various aspect ratios. *Urban Climate*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101299>

Hang, J., Chen, X., Chen, G., Chen, T., Lin, Y., Luo, Z., Zhang, X., & Wang, Q. (2020). The influence of aspect ratios and wall heating conditions on flow and passive pollutant exposure in 2D typical street canyons. *Building and Environment*, 168, 106536. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106536>

Karimimoshaver, M., Khalvandi, R., & Khalvandi, M. (2021). *The effect of urban morphology on heat accumulation in urban street canyons and mitigation approach*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103127>

Li, X. X., Liu, C. H., & Leung, D. Y. C. (2005). Development of a k- ϵ model for the determination of air exchange rates for street canyons. *Atmospheric Environment*, 39(38), 7285–7296. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.007>

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/QJ.49710845502>

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban Climates by T. R. Oke. *Urban Climates*, 1–525. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

Saqr, K. M., Wmy, A., Csn, A., & Saqr, K. (2012). Effects of buildings aspect ratio, wind speed and wind direction on flow structure and pollutant dispersion in symmetric street canyons: A review. In *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)* (Vol. 7, Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/256839331>

Sukri, M., & Ali, M. (2016). *Computational Investigations and Grid Refinement Study of Wind Flow Characteristics within Two-Dimensional Street Canyon using Large-eddy Simulation*. <https://www.researchgate.net/publication/309634464>

Xie, X., Liu, C. H., Leung, D. Y. C., & Leung, M. K. H. (2006). Characteristics of air exchange in a street canyon with ground heating. *Atmospheric Environment*, 40(33), 6396–6409. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.050>

Yang, H., Lam, C. K. C., Lin, Y., Chen, L., Mattsson, M., Sandberg, M., Hayati, A., Claesson, L., & Hang, J. (2021). Numerical investigations of Re-independence and influence of wall heating on flow characteristics and ventilation in full-scale 2D street canyons. *Building and Environment*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107510>

Yang, L., Qian, F., Song, D. X., & Zheng, K. J. (2016). Research on Urban Heat-Island Effect. *Procedia Engineering*, 169, 11–18. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.10.002>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

