

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE VENTILACIÓN NATURAL DE DISTINTAS LOCALIDADES DE LA ARGENTINA

Silvina González^{1,2}, Marcelo Valdez^{1,3}, Silvana Flores Larsen^{1,2}

¹Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO, UNSa – CONICET), Universidad Nacional de Salta, CP 4400, Salta, Argentina

²Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, CP 4400, Salta, Argentina

³Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, CP 4400, Salta, Argentina.

Tel. 0387-4255578 e-mail: ing.silvina.gonzalez@gmail.com

Recibido 08/2023; Aceptado 10/2023

RESUMEN.- La ventilación natural en edificios residenciales es una estrategia bioclimática fundamental para reducir los consumos de energía eléctrica destinados a la climatización para garantizar el confort térmico de los habitantes de una vivienda. Además del diseño y orientación adecuados de las aberturas (puertas y ventanas) de una vivienda o edificio, la efectividad de la ventilación natural como estrategia de climatización pasiva depende de las condiciones ambientales del lugar. En este trabajo se analizan las condiciones meteorológicas típicas y se determina el potencial de ventilación natural de ochenta y siete (87) ubicaciones a lo largo del territorio argentino, distribuidas en todas las provincias y en prácticamente todas las regiones climáticas del país. En base al año meteorológico típico de cada ubicación se computa una hora de ventilación natural cada vez que la temperatura del aire exterior, la temperatura de punto de rocío y la velocidad del viento se encuentran entre los valores establecidos por las condiciones de confort de los habitantes. Los resultados indican que el territorio argentino posee un excelente potencial (por encima de las 2190 h o del 25% de las horas anuales) para aprovechar la ventilación natural como estrategia pasiva de climatización durante prácticamente todo el año. De acuerdo a los resultados obtenidos, las regiones con climas templado pampeano, templado serrano, árido de sierras y campos, y árido de la estepa patagónica son las más favorables para el aprovechamiento de las estrategias de ventilación natural.

Palabras clave: estrategias bioclimáticas, velocidad del viento, regiones climáticas

EVALUATION OF THE POTENTIAL OF NATURAL VENTILATION OF SEVERAL ARGENTINEAN LOCATIONS

ABSTRACT.- Natural ventilation in residential buildings is a key bioclimatic strategy to help reduce the electrical energy consumption associated with air conditioning to ensure the thermal comfort of the occupants of a building. Apart from an adequate design and orientation of the openings (doors and windows), the effectiveness of natural ventilation as a passive cooling strategy depends on the environmental conditions of the area. In this effort, the typical meteorological conditions are analyzed and the natural ventilation potentials are determined for eighty-seven (87) locations throughout the Argentinean territory. These sites are located in each of the provinces of the country and are inserted in practically all the climatic regions. Using the typical meteorological year of each location, the natural ventilation potential is computed by adding up all the hours of the year in which the dry bulb temperature, the dew point and the wind speed are within the values required for the thermal comfort of the occupants. The results show that the Argentinean territory has excellent potential (above 2190h during the year, or 25%) to exploit natural ventilation as a passive cooling strategy throughout most of the year. The tempered (templado pampeano and templado serrano), and arid (de sierras y campos y de la estepa patagónica) climates where found to be the most proper to leverage natural ventilation strategies.

Keywords: bioclimatic strategies, wind speed, climatic regions

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, exacerbado por las emisiones de gases de efecto invernadero, entre otras causas, es una preocupación mundial creciente que amenaza el medio ambiente, la salud y la economía en todo el mundo. Los edificios residenciales y no residenciales son grandes emisores de gases de efecto invernadero debido a sus elevadas demandas energéticas para climatización. Dado que las necesidades energéticas de los edificios dependen en gran me-

da de los patrones climáticos, la ventilación natural ha demostrado ser una técnica efectiva no sólo para la reducción del consumo energético de edificios (Su et al., 2023; Li y Wang, 2020; Yao et al., 2009; Cardinale et al., 2003; Oropeza-Pérez y Østergaard, 2014a) sino también para asegurar la salubridad del aire (Rawat y Kumar, 2023; Tong et al., 2016). Esto último fue particularmente importante durante la pandemia de COVID19 (Rey-Hernández et al., 2023; Villanueva et al., 2021). La efectividad de la ventilación natural para reducir el consumo energético depende principalmente del cli-

ma del lugar, del diseño y materiales del edificio y de las acciones de los ocupantes en relación a la apertura o cierre de ventanas (Liu y Lee, 2020; Yoon et al., 2020). Este trabajo se centra en el primero de los aspectos mencionados, es decir, en la caracterización de las condiciones climáticas de un lugar para evaluar el potencial de ventilación natural.

Se han realizado numerosos esfuerzos para caracterizar el potencial de ventilación natural de distintos lugares el mundo. Por ejemplo, Roulet et al. (2006) caracterizaron como “bueno”, “mediano” y “pobre” el potencial de ventilación natural de barrios en Ginebra, Suiza, visualizando los resultados en un mapa GIS. Para dicho análisis se tuvieron en cuenta la velocidad y dirección del viento, la temperatura del aire, la altura media de los edificios, la orientación media de las calles y la adyacencia de los edificios con los vecinos. Artmann et al. (2007) propusieron una métrica denominada *potencial climático para la ventilación natural* (CPNV por sus siglas en inglés) basada en la temperatura y la humedad del aire. Esta métrica cuantifica qué tan propenso es un clima para favorecer la ventilación natural. Dichos autores propusieron temperaturas límite inferior y superior en base al modelo adaptativo de ASHRAE 55-2013, y límites inferior y superior para la humedad relativa del 30% y 70%, respectivamente. El indicador CPNV constituye el porcentaje de las horas en las cuales las condiciones climáticas verifican ambos criterios, con respecto al número total de horas en un año. Por su parte, Oropeza-Pérez y Østergaard (2014b) estimaron el potencial de ventilación natural en Dinamarca y especularon que es posible reducir hasta en un 90% la cantidad de horas de uso de ventilación mecánica si se emplea la ventilación natural durante el verano. Empleando datos meteorológicos globales, Chen et al. (2017) estudiaron el potencial de ventilación natural de 1854 localidades distribuidas en los seis continentes (en Argentina, sólo se analizó la ciudad Autónoma Buenos Aires). Además, dichos autores seleccionaron 60 grandes ciudades del mundo para estimar, mediante simulación computacional, el posible ahorro de energía de un edificio al emplear ventilación natural en lugar de ventilación forzada. Los autores concluyeron que el potencial de venti-

lación basado exclusivamente en las condiciones climáticas, es un indicador que permite estimar el máximo de ahorro de energía de un edificio sin la necesidad de realizar una simulación computacional detallada. Como se observa, este tipo de métricas, basadas únicamente en datos climáticos, resultan muy útiles para obtener información de referencia. Por esta razón, son ampliamente utilizadas en la literatura como parte del análisis de la eficiencia de la ventilación natural en edificios (Yoon et al., 2020).

En Argentina, el potencial de ventilación natural no ha sido caracterizado aún de manera completa. Según la clasificación de Köppen, Argentina posee al menos quince (15) zonas climáticas (Figura 1). La enorme variedad de climas de nuestro país requiere de un análisis detallado que incluya a numerosas localidades insertas en cada uno de los distintos tipos de climas. Muchos sitios, sin embargo, no cuentan con suficientes registros de las condiciones meteorológicas exteriores o dichos registros son incompletos.

El objetivo de este trabajo es la evaluación del potencial de ventilación natural en el territorio Argentino. Para ello se seleccionaron 87 estaciones meteorológicas de la base de datos onebuilding.org. La selección se basó en disponibilidad de datos medidos del Servicio Meteorológico Nacional durante el período de 15 años entre 2007 y 2021. Para calcular el potencial de ventilación natural de los sitios seleccionados se emplea la metodología desarrollada por Chen et al. (2017).

2. METODOLOGÍA

La Argentina es un territorio que cuenta con una gran variedad de zonas climáticas con características muy diferentes. Las características climáticas se estudian mediante el registro de determinadas variables meteorológicas de una región, durante un período de tiempo prolongado con intervalos de tiempo reducidos. Las principales variables registradas son temperatura, humedad relativa, punto de rocío, presión atmosférica, velocidad y dirección viento, precipitación, entre otras.

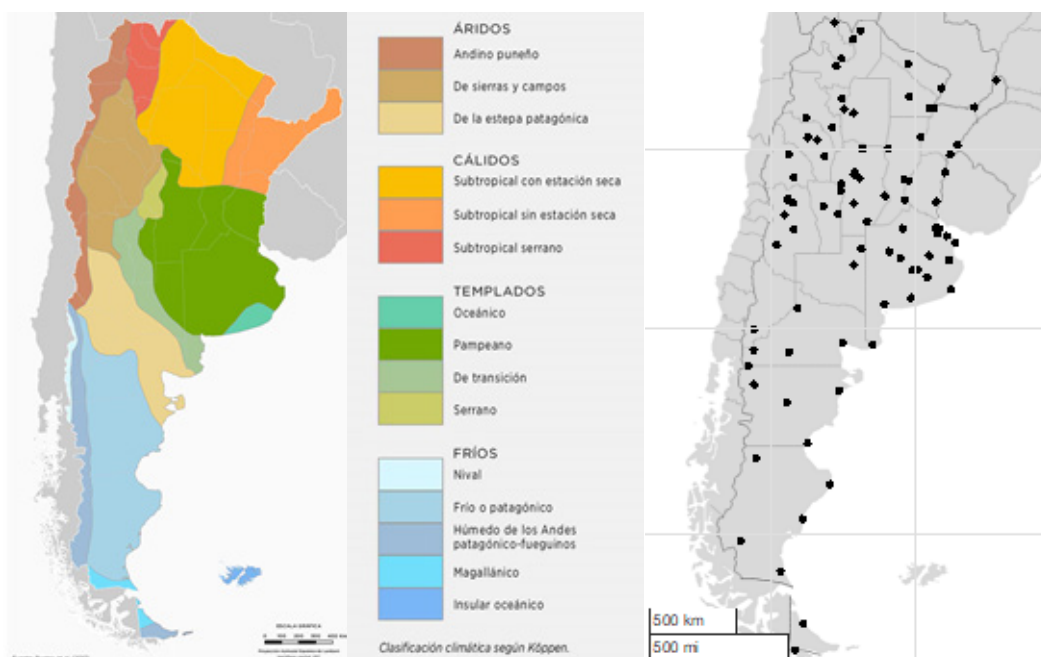


Fig. 1: Izquierda: clasificación climática de Argentina según el IGN (Instituto Geográfico Nacional), fuente: Gentile et al. (2019). Derecha: sitios seleccionados para el análisis.

Para analizar el potencial de ventilación en el territorio argentino se emplearon los datos meteorológicos disponibles en el sitio web onebuilding.org. Los datos empleados corresponden a los Años Meteorológicos Típicos (AMT o TMY en inglés) de ochenta y siete (87) ubicaciones del territorio argentino en formato "EPW". Dichos AMT se obtuvieron a partir de los datos de distintas estaciones meteorológicas registrados en el período de 2007 a 2021. De estos archivos se extrajeron los valores horarios de la velocidad del viento, la temperatura exterior y la temperatura de punto de rocío, que son necesarios para la determinación del potencial de ventilación en horas según se detalla a continuación. En la figura 1 se muestran las ubicaciones geográficas de las ochenta y siete estaciones meteorológicas cuyos AMT fueron analizados para este estudio. Se observa que dichas ubicaciones cubren prácticamente todas las zonas climáticas del país.

Las horas de ventilación natural (NV por sus siglas en inglés) es un indicador que representa el potencial máximo de ventilación natural en una determinada región. Este indicador expresa la cantidad de horas o el porcentaje de las horas de un período de tiempo (anual, mensual, etc.) en las cuales las condiciones ambientales exteriores son propicias para la ventilación natural (Chen et al., 2017). Para determinar si las condiciones climáticas exteriores y la calidad de aire son adecuadas para la ventilación natural Chen et al. establecieron los siguientes criterios:

1. La temperatura exterior de bulbo seco debe ser menor que el umbral superior del modelo de confort térmico adaptativo, T_{up} (Ec. 1) y mayor que $T_{low}=12,8^{\circ}C$, la temperatura de aire de suministro más baja especificada en ASHRAE 55 y en el manual de Fundamentos de AHSRAE. Este límite inferior se emplea para evitar corrientes de aire demasiado frías e incómodas para los ocupantes.

$$T_{up} = 0,31T_{out} + 17,8 + 0,5\Delta T_{80\%} \text{ (}^{\circ}C) \quad (1)$$

donde:

T_{out} es la temperatura exterior media mensual ($^{\circ}C$),
 $\Delta T_{80\%}$ es el salto medio de temperatura de la zona de confort. $\Delta T_{80\%}=7^{\circ}C$, para una aceptabilidad del 80%.

En este trabajo, la temperatura T_{out} se limita a un valor de $27^{\circ}C$, que es temperatura de confort del modelo de confort adaptativo.

2. El punto de rocío no debe superar el umbral de $17^{\circ}C$ obtenido como combinación de las zonas de confort de verano e invierno (ASHRAE 55) para garantizar que las condiciones de humedad se mantengan en valores confortables.

3. La velocidad del aire interior u_{in} no debe ser superior a $u_{in,max} = 0.8$ m/s (ASHRAE 55). La velocidad del viento u_{out} correspondiente se calcula en base a la expresión empírica (Ec. 2) de Phaff et al. (1980). Dicha expresión incluye el efecto combinado de la velocidad del viento, de la diferencia de temperatura ΔT_{max} entre el aire interior y el aire exterior y de la turbulencia.

$$u_{out,up} = \sqrt{\frac{u_{in,max}^2 - C_2 h \Delta T_{max} - C_3}{C_1}} \quad (2)$$

donde:

h m es la altura de abertura,
 $C_1 = 0,001$ es el coeficiente de velocidad del viento,
 $C_2 = 0,0035$ ms-2K-1 es el coeficiente de flotabilidad,

$C_3 = 0,02$ m2s-2 es el coeficiente de turbulencia.

Siguiendo la sugerencia de Chen et al., la variación de la velocidad del viento en función de la altura no se tiene en cuenta en este trabajo debido a que son necesarios datos orográficos y meteorológicos adicionales (por ejemplo, la longitud de la rugosidad de la superficie, la estabilidad atmosférica, etc.). En este trabajo, al igual que en Chen et al., se calcula ΔT_{max} como la diferencia entre T_{out} y T_{low} . Se fija un límite máximo para $u_{out,up}$ en 13.8 m/s, para considerar solo vientos en hasta la categoría "brisa fuerte" o número 6 de la escala de Beaufort.

Las horas propicias para la ventilación natural NV son aquellas en las cuales se satisfacen simultáneamente las tres (3) condiciones.

La metodología empleada solo permite caracterizar el potencial de ventilación de una localidad de en términos generales. Los datos meteorológicos empleados son de estaciones meteorológicas que están ubicadas, por lo general, en zonas abiertas (principalmente en aeropuertos), libres de edificaciones y obstrucciones cercanas y con una orografía particular. Por lo tanto, dicho datos no son representativos de (pero están correlacionados con) las condiciones ambientales en las zonas urbanizadas. Para determinar el potencial de ventilación natural de una ubicación específica será necesario incluir en el análisis todas las variables que afectan a la velocidad de viento, a la temperatura exterior y a la temperatura del punto de rocío.

3. RESULTADOS

En la figura 2a se muestra la distribución del potencial de ventilación natural anual en el territorio argentino. Los resultados indican que la mayoría de las localidades analizadas poseen condiciones ambientales propicias para emplear la ventilación natural durante más del 25% del año. Particularmente, la localidad de Tinogasta en la provincia de Catamarca, posee el mejor potencial de ventilación natural durante el año (5188 h, 59,2% de las 8760h anuales). Del histograma de la figura. 2b, se concluye que 65 de las 87 ubicaciones analizadas poseen un potencial anual de ventilación natural entre 3500h (40%) y 5000h (56,4%). Este resultado es alentador ya que si en todas esas ubicaciones se implementan estrategias de ventilación natural, el ahorro de energía por el reemplazo de la ventilación forzada (aires acondicionados, ventiladores, etc.) sería significativo. En el diagrama de cajas de la figura. 2c se destacan los meses de abril (inicios del otoño), octubre y noviembre (mediados de la primavera) como los meses con mediana de horas de ventilación natural más elevadas. Los meses de diciembre y enero (verano) reportan los valores máximos del potencial de ventilación.

En la figura. 3 se detalla la distribución del potencial de ventilación natural según la estación del año. Como se mencionó anteriormente, durante el verano se registran los máximos valores del potencial de ventilación, los cuales se presentan en la localidad de Tinogasta, Catamarca (1930h, 89% del período), Chilecito, La Rioja (1875h, 87% del período), Jachal, San Juan (1857h, 86% del período) y Maquinchao, Río Negro (1644h, 76% del período). Estas localidades, pertenecientes a las regiones climáticas árida de sierras y campos, y árida de estepa, son las más propicias para aprovechar la ventilación natural como estrategia de ahorro energético y de refrescamiento en verano.

Al analizar el período estival (2160 h en total) se observa una mayor diferenciación de los potenciales de ventilación natural entre

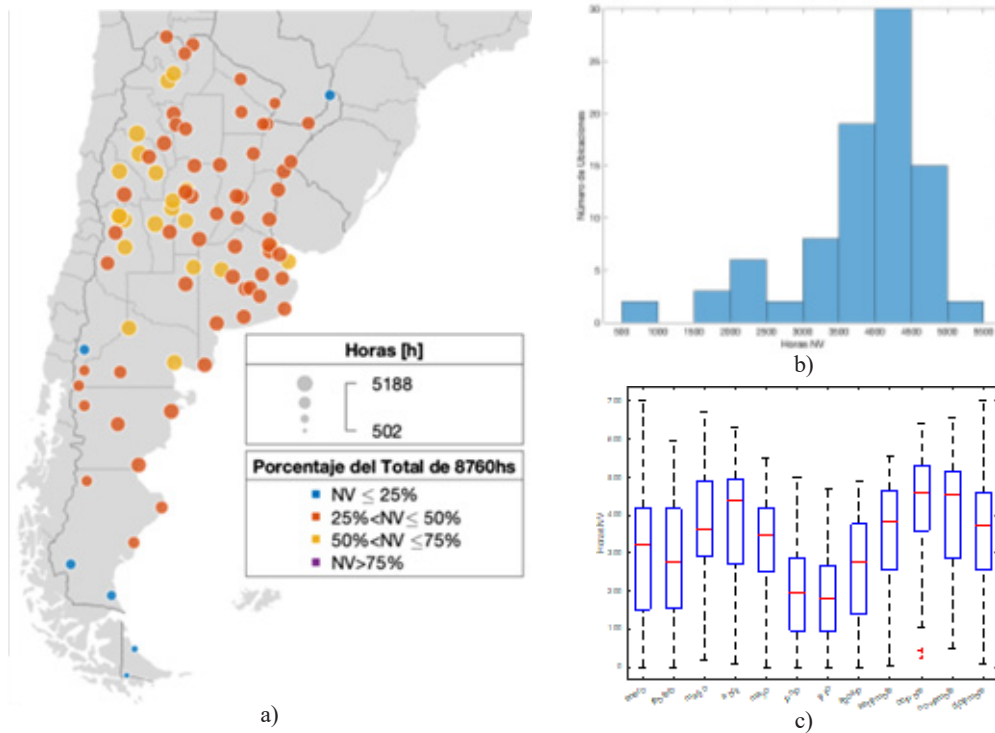


Fig. 2: Potencial de ventilación anual. a) Distribución de horas de NV por ubicación. b) Histograma. c) Diagrama de cajas para cada mes del año meteorológico típico.

las diferentes localidades. Es notorio el bajo potencial de ventilación (por debajo del 25%) en la región del noreste y la parte central del noroeste (este de Salta, Tucumán y Santiago del Estero). Estas localidades se encuentran en las regiones con climas subtropicales con y sin estación seca (Figura 1). Los bajos potenciales de ventilación natural en dichas zonas están asociados a la elevada humedad. En la franja central del país entre las latitudes 30S y 42S, correspondientes a los climas templados y áridos se concentran los potenciales de ventilación entre el 25% y el 75% para el verano.

Durante el período otoñal se observa una clara diferenciación entre el potencial de ventilación de la Patagonia y del resto del país. Salvo algunas localidades, todas las ubicaciones insertas el clima frío o patagónico poseen potenciales de ventilación inferiores al 25%, mientras que en el resto del país los potenciales de ventilación se encuentran entre el 25% y el 50%, en centro del país, y por encima del 50% en la región norte y noroeste.

Los resultados para el período invernal son similares a los del otoño, con la adición de algunas localidades en las provincias de

Chubut, Buenos Aires, Mendoza, San Juan donde el potencial de ventilación es inferior al 25%. Para el noreste del país, el potencial de ventilación continúa estando entre el 50% y el 75%.

En la primavera, se observa la disminución del potencial de ventilación natural de la mayoría de las ubicaciones en el noreste del país, correspondiente a los climas subtropicales con y sin estación seca y el aumento del potencial de ventilación en la zona central del país (climas templados y áridos).

La figura 4 muestra un diagrama de cajas indicando la cantidad de horas de ventilación natural por provincia analizada. En este gráfico, se destacan las provincias de La Rioja, San Juan y Catamarca por sus altas medianas y sus amplios rangos intercuartílicos. Todas estas provincias se encuentran insertas en el clima árido de sierras y campos.

En la figura. 5 se representa en un diagrama de cajas el potencial de ventilación natural anual agrupado por región climática. En este gráfico, se destacan claramente los climas áridos de sierras y

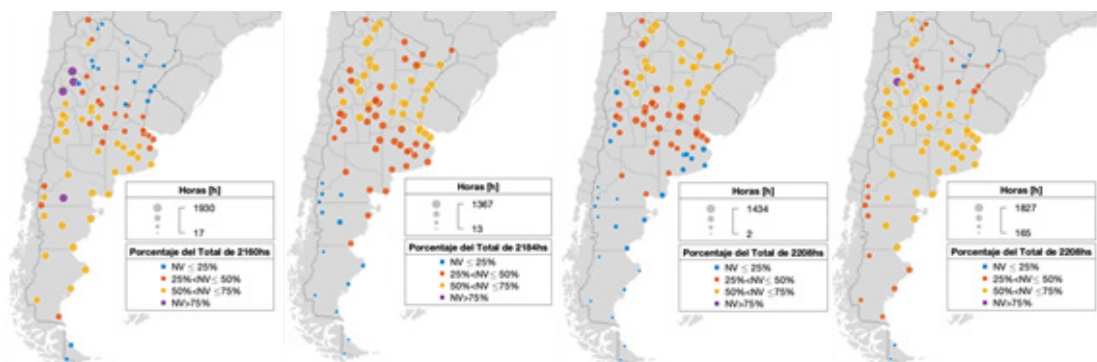


Fig. 3: Potencial de ventilación por estación del año. De izquierda a derecha: verano, otoño, invierno, primavera.

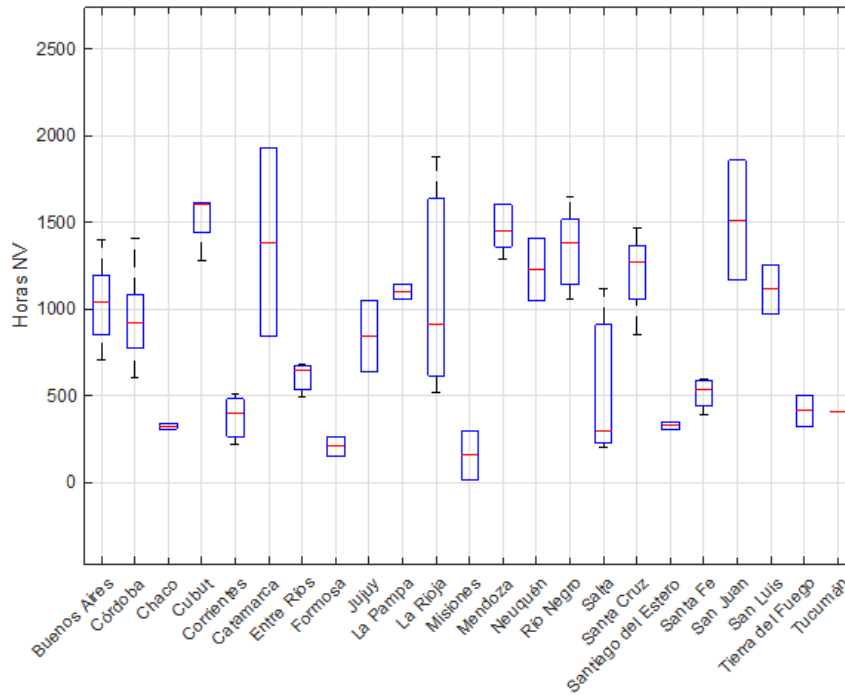


Fig. 4: Diagrama de cajas del potencial de ventilación natural durante el año meteorológico típico para cada provincia.

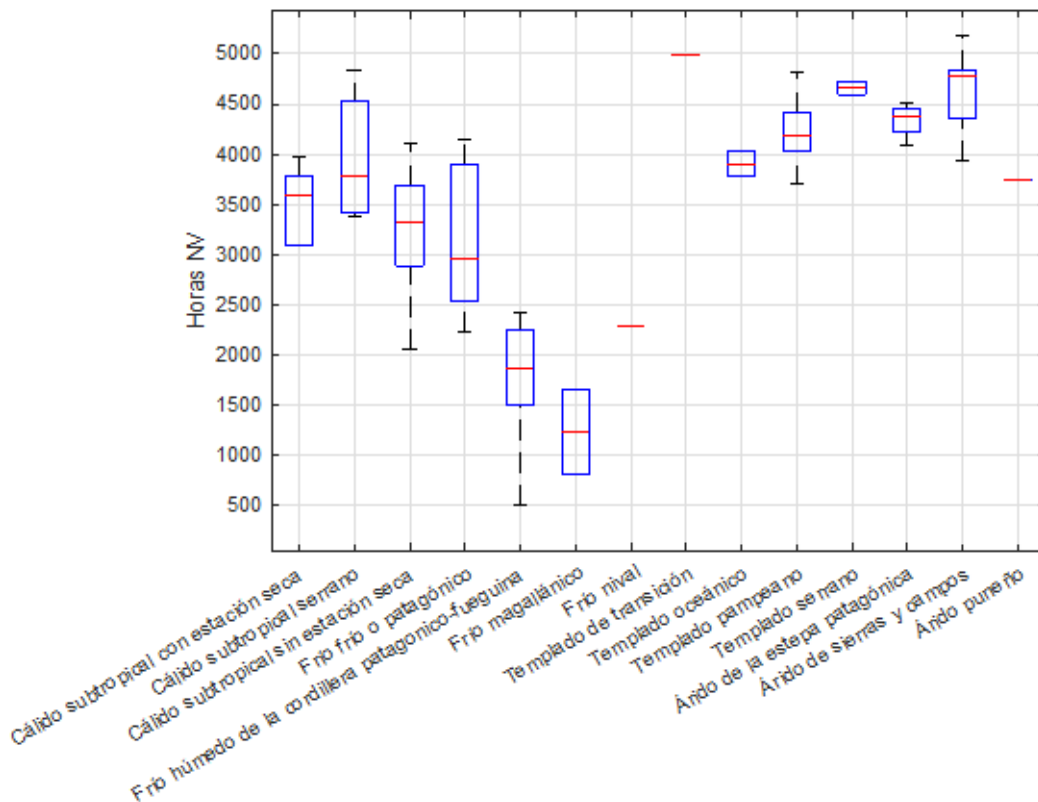


Fig. 5: Diagrama de cajas del potencial de ventilación natural durante el año meteorológico típico para cada región climática del territorio argentino.

campos y de la estepa patagónica, templados serrano y pampeano como las regiones más óptimas de la Argentina para aprovechar la ventilación natural como estrategia de refrescamiento y de ahorro de energía. Se observa, sin embargo, que en el presente análisis algunas regiones climáticas no tienen una cantidad adecuada de ubicaciones para ser caracterizadas correctamente como lo son las regiones de frío nival, templado de transición y árido puneño.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el potencial de ventilación natural de ochenta y siete ubicaciones a lo largo del territorio de la República Argentina. El análisis realizado se basó en la metodología de Chen et al. (2017), la cual toma en consideración exclusivamente los factores ambientales del sitio: temperatura de bulbo seco, la tem-

peratura del punto de rocío (asociada a la humedad relativa) y la velocidad del viento exterior (en cualquier dirección). Este análisis permite determinar cuantitativamente el potencial de una ubicación geográfica para aprovechar la ventilación natural como una estrategia pasiva de refrescamiento o para renovación de aire, independientemente del diseño y orientación de la edificación en particular. Los resultados obtenidos sugieren que el territorio argentino posee un adecuado potencial de ventilación natural para todo el año. A excepción de algunas localidades insertas en los climas frío húmedo de los Andes patagónico-fueguino y el subtropical sin estación seca (Iguazú, Misiones), el potencial de ventilación anual del resto del país es superior al 25% (2190 h). En general, la región central de país, inserta en los climas templado pampeano, templado serrano, árido de sierras y campos y árido de la estepa patagónica constituyen las regiones climáticas más propicias para el aprovechamiento de las estrategias de ventilación natural y para el ahorro de energía asociada con la reducción del uso de ventilación forzada en los períodos de primavera y verano. Según Chen et. al. (2017) las horas NV puede indicar el potencial máximo de ahorro de energía empleando ventilación natural.

En trabajos futuros se analizará el potencial de ventilación teniendo en cuenta, además de la velocidad del viento, la dirección del viento. Dicho análisis permitirá establecer conclusiones más precisas en relación a la orientación preferida de las aberturas de las edificaciones para maximizar el efecto de la ventilación natural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo y financiación del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA) a través de los proyectos CIUNSA Tipo C N° 2853/0 y Tipo A N° 2489.

REFERENCIAS

- Artmann N., H. Manz, P. Heiselberg. (2007). Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe, *Appl. Energy* 84 187–201, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.05.004>.
- ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 2013. Atlanta, GA.
- Beck, Hylke E. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5 (1): 180214. DOI:10.1038/sdata.2018.214. ISSN 2052-4463
- Cardinale N., M. Micucci, F. Ruggiero. (2003). Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian building, *Energy Build.* 35 153–159, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00024-5).
- Chen, Y., Tong, Z., & Malkawi, A. (2017). [en línea] Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. *Building and Environment*, 122, 386-396.
- Gentile, E.E., Martín, P.B. y Gatti, I.A. (2019). Argentina Físico-Natural: Clima de Argentina. ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina. <<https://ide.ign.gob.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=b58d8b8841ef472e962317ca-c879e87f>>[consulta: 10 de agosto de 2023]
- Li W., S. Wang (2020). A multi-agent based distributed approach for optimal control of multi-zone ventilation systems considering indoor air quality and energy use. *Appl Energy*, 275 (2020), Article 115371.
- Liu T., W.L. Lee (2020). Influence of window opening degree on natural ventilation performance of residential buildings in Hong Kong, *Science and Technology for the Built Environ*, 26 (1) (2020), pp. 28-41.
- Oropeza-Perez I., Poul Alberg Østergaard (2014a). Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions—A case study of Mexico, *Applied Energy* 130, 2014, Pages 20-32, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.035>.
- Oropeza-Perez I., P.A. Østergaard (2014b), Potential of natural ventilation in temperate countries - A case study of Denmark, *Appl. Energy* 114 (2014b) 520-530.
- J. Phaff, W. de Gids, J. Ton, D. van der Ree, L. Schijndel. (1980). The Ventilation of Buildings: Investigation of the Consequences of Opening One Window on the Internal Climate of a Room, Report C 448, TNO Institute for Environmental Hygiene and Health Technology (IMG-TNO), Delft, The Netherlands.
- Rawat N., P. Kumar (2023). Interventions for improving indoor and outdoor air quality in and around schools. *Sci Total Environ*, 858, Article 159813
- Rey-Hernández J., Yolanda Arroyo-Gómez, Julio F. San José-Alonso, Francisco J. Rey-Martínez. (2023). Assessment of natural ventilation strategy to decrease the risk of COVID 19 infection at a rural elementary school, *Heliyon*, Volume 9, Issue 7, , e18271, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18271>.
- Roulet C.-A., M. Germano, F. Allard, C. Ghiaus. (2002). Potential for natural ventilation in urban context: an assessment method, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Monterey, CA, pp. 830–835.
- Su W., Zhengtao Ai, Jing Liu, Bin Yang, Faming Wang. (2023). Maintaining an acceptable indoor air quality of spaces by intentional natural ventilation or intermittent mechanical ventilation with minimum energy use, *Applied Energy*, Volume 348, 121504, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121504>.
- Tong., Y. Chen, A. Malkawi, G. Adamkiewicz, J.D. Spengler. (2016). Quantifying the impact of traffic-related air pollution on the indoor air quality of a naturally ventilated building, *Environ. Int.* 89e90 138-146.
- Villanueva F., A. Notario, B. Cabanas, P. Martín, S. Salgado, M.F. Gabriel. (2021). Assessment of CO2 and aerosol (PM2.5, PM10, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: the case of a metropolitan area in Central-Southern Spain. *Environ. Res.*, 197, Article 111092, 10.1016/J.ENVRES.2021.111092
- Yao R., B. Li, K. Steemers, A. Short. (2009). Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China, *Renew. Energy* 34 (12) 2697e2705.
- Yoon, N., Norford, L., Malkawi, A., Samuelson, H., & Piette, M. A. (2020). Dynamic metrics of natural ventilation cooling effectiveness for interactive modeling. *Building and Environment*, 180, 106994.