

POTENCIAL DE VENTILACIÓN NATURAL EN LA PROVINCIA DE SALTA. EFICIENCIA DE LA VENTILACIÓN NATURAL NOCTURNA EN VIVIENDAS SOCIALES

Camila Escudero¹, Silvana Flores Larsen²

¹Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina

²INENCO – (UNSa – CONICET) – Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina

Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387- 4255389 – Email: escuderocamila32@gmail.com

RESUMEN: El trabajo estudia el potencial de ventilación natural en siete localidades de la provincia de Salta con condiciones climáticas diferentes y la Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural, para una vivienda social ubicada con la misma orientación en tres localidades seleccionadas (Salta Capital, Cafayate y Rivadavia). Para ello, se utilizó el software *EnergyPlus*, simulando una vivienda del IPV en estas tres locaciones para los meses de octubre a marzo, suponiendo ventilación nocturna de 19 a 7 horas. Los resultados indican que los niveles de potencial de ventilación de Salta se alcanzan un máximo de 22% en diciembre y un mínimo de 6% en octubre, repitiéndose este patrón para Cafayate con valores un poco mejores, 22% en diciembre y de 14% en octubre, los de Rivadavia insuficientes presentando 16% de máximo en octubre y 5% de mínimo en enero. En base a lo observado, se sugiere mejorar la ventilación natural del hogar a través del correcto dimensionamiento y ubicación de las aberturas, complementando con extracción activa del aire de ser necesario.

Palabras clave: Ventilación Natural, vivienda social, ahorro energético, confort térmico, simulación computacional

INTRODUCCIÓN

El sobrecalentamiento interior causado por temperaturas cada vez más elevadas y olas de calor más frecuentes debido al cambio climático es un problema que adquiere relevancia y que es necesario abordar con urgencia. En Argentina las olas de calor son cada vez más frecuentes (Camilloni, 2018), de mayor intensidad y duración. Por ello, es importante estudiar la efectividad de distintas estrategias de refrescamiento, principalmente las estrategias pasivas que permiten disminuir el consumo energético edilicio. Una de las estrategias de refrescamiento más utilizadas es la ventilación natural, que ha demostrado ser una técnica efectiva 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, 2014; Rawat y Kumar, 2023). La efectividad de la ventilación natural para reducir el consumo energético depende principalmente del clima 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). En distintas investigaciones se utiliza el término “potencial de ventilación natural” para indicar el uso de la ventilación natural, principalmente en dos aspectos. El primero, busca analizar si una determinada locación cuenta con las cualidades meteorológicas, climáticas y térmicas para que en un edificio se pueda usar la ventilación natural como un método de enfriamiento del interior. El segundo, busca describir el potencial de un edificio para utilizar la ventilación natural, analizando la posición de sus ventanas, el tamaño de las aberturas, etc. En consecuencia, es importante poder determinar el potencial de ventilación en una localidad de acuerdo a sus condiciones climáticas y su efecto sobre los ambientes interiores.

Existen diversas metodologías (Yang *et al.*, 2005; Yao *et al.*, 2009; Germano *et al.*, 2006) para cuantificar el potencial de ventilación natural (NVP), las más convencionales incluyen velocidades de flujo de aire, recambios de aire por hora (ACH), o el número total de horas en un año en que haya buenas

condiciones para utilizar ventilación natural (horas NV). Otras métricas más novedosas son el potencial climático para la ventilación natural (CPNV), la diferencia de presión horas Pascal (PDPH), el potencial de enfriamiento climático (CCP), el indicador de performance de ventilación (VPI), las horas de ventilación natural satisfechas (SNVH) y la efectividad de ventilación natural (NVE). En este trabajo se utilizan las horas de ventilación natural (NV) disponibles (Chen *et al.*, 2017; Yoon *et al.*, 2020) que se definen como el número de horas en un año típico (de las 8760h que posee) de las cuales las condiciones climáticas son óptimas para poder utilizar ventilación natural. Éste es un indicador que mide el potencial máximo de ventilación natural para un sitio determinado.

Para estimar la eficacia de la ventilación natural en un edificio para disminuir la temperatura interior, las métricas a utilizar deben tener en cuenta la información meteorológica en conjunto con las características específicas del diseño del edificio, como ser la respuesta dinámica de los materiales de la envolvente, el diseño de las ventanas, de las aberturas, las respuestas estacionarias y las dinámicas del edificio al clima en el que se encuentra. En este trabajo se propone estimar la eficacia de la ventilación natural del método propuesto por Yoon *et al.* (2020), modificado para acoplarlo a simulaciones numéricas, como se explica en las siguientes secciones.

En este marco, los objetivos de este trabajo son: estudiar el potencial de ventilación natural existente en siete localidades de la provincia de Salta con diferentes climas, proponer una metodología para estimar el potencial de ventilación en un edificio y aplicarlo a una vivienda para estudiar los efectos de la ventilación natural en la misma, ubicada en tres localidades de la provincia de Salta. El caso de estudio seleccionado es una residencia del Instituto Provincial de la Vivienda (IPV). La tipología seleccionada es representativa de las viviendas sociales en el Noroeste y en su mayoría están habitadas por sectores con dificultades para afrontar el costo del equipamiento y la energía necesarios para acondicionar térmicamente sus domicilios. La vivienda se emplazará en las tres localidades del estudio y se analizará el impacto de la ventilación natural en la misma.

METODOLOGÍA

Localidades del estudio y datos climáticos

Se seleccionaron siete localidades en la provincia de Salta que presentan condiciones climáticas bien diferenciadas: las ciudades de Salta, Orán, Tartagal y Rosario de la Frontera (clima subtropical húmedo con estación seca y verano cálido, Cwa según la clasificación climática de Köppen-Geiger), Cafayate (en los Valles Calchaquíes, clima árido templado y frío, con inviernos secos BWk según Köppen-Geiger) y Rivadavia y Güemes (en el Chaco salteño, clima semiárido cálido BSh según Köppen-Geiger). Rivadavia es una de las ciudades en las que las altas temperaturas suelen ser noticia, como sucedió el 7 de diciembre de 2022 en que el registró 46 °C de temperatura máxima la convirtió en una de las más calurosas del mundo durante ese día.

Para el estudio se utilizaron los años típicos meteorológicos de cada una de las localidades. Se utilizó la base de datos climáticos de climate.onebuilding.org, la cual dispone de los años típicos meteorológicos para Salta Capital, Orán, Tartagal y Rivadavia calculados a partir de datos provistos por las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el periodo más actual 2007-2021. Para las otras localidades (Cafayate, Güemes y Rosario de la Frontera), en que no existe una estación del SMN, se utilizó el software Meteonorm para generar los datos del año típico meteorológico.

Horas de ventilación (NV) y Potencial de Ventilación Natural (CPNV)

Se considera que el aire exterior tiene potencial para ventilación natural cuando su temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y la velocidad de viento se encuentran dentro de los rangos que se definen a continuación.

Para establecer la temperatura de bulbo seco máxima (T_{up}) se calcula la temperatura máxima estimada por el modelo de confort adaptativo propuesto por de Dear y Brager (de Dear y Brager, 2002), para una aceptabilidad del 80%. El cálculo se realiza mes a mes, utilizando la temperatura media mensual de la localidad:

$$T_{up} = 0,31 T_{MediaMensualExt} + 17,8 + \frac{1}{2} \Delta T_{80\%} \quad (1)$$

donde:

$T_{MediaMensualExt}$: temperatura media mensual exterior, calculada como el promedio de las temperaturas horarias a lo largo de un mes

$\Delta T_{80\%}$: banda de confort para un 80% de aceptación ($\Delta T_{80\%}=7^{\circ}\text{C}$)

Tipos de clima de Salta

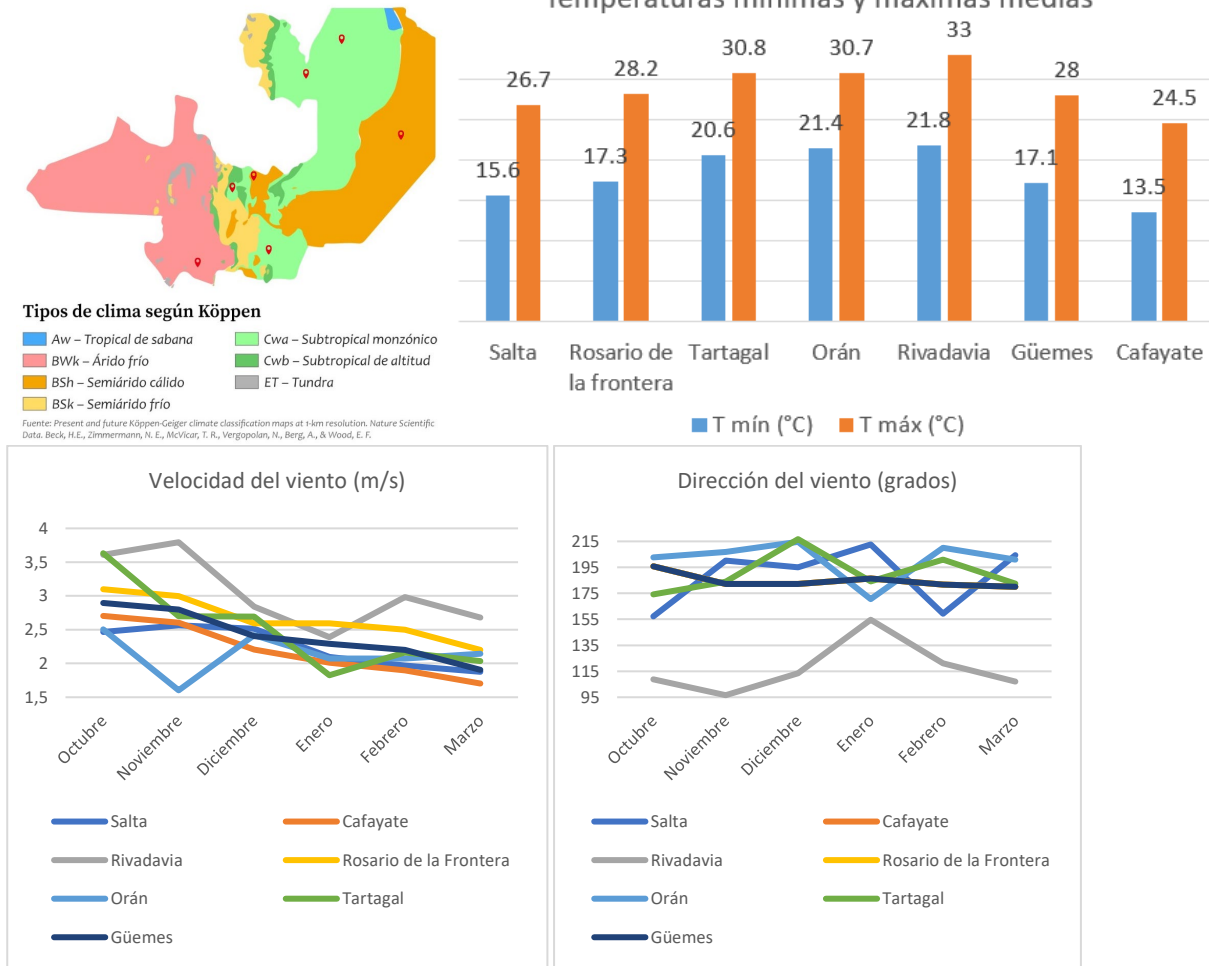


Fig. 1. Izquierda Arriba: ubicación de las localidades estudiadas en el diagrama climático de Köppen-Geiger. Fuente: Beck et al. (2018). Derecha Arriba: temperatura media máxima y mínima de las localidades, para los meses del periodo cálido octubre-marzo. Izquierda Abajo: velocidad del viento de las localidades, para los meses del periodo cálido octubre-marzo. Derecha Abajo: dirección del viento en grados, para los meses del periodo cálido octubre-marzo. Fuente de los últimos tres gráficos: elaboración propia a partir de datos del SMN.

En caso en que la temperatura T_{up} estimada con la Eq. (1) exceda los 27°C , se toma como límite superior este valor, el cual se considera el límite de la zona de confort.

Para la temperatura de bulbo seco mínima (T_{low}), se establece un valor de $12,8^{\circ}\text{C}$, correspondiente a la Temperatura de aire más baja especificada en ASHRAE 55 para evitar el desconfort térmico). El límite superior para punto de rocío es 17°C (también sugerido en ASHRAE 55 y utilizado por Chen *et al.*, 2017). Esta temperatura se limita para controlar la humedad, debido que para climas con altos porcentajes de humedad esta estrategia de ventilación no funciona.

La velocidad máxima permitida en interiores ($u_{in,m\acute{a}x}$) es de 0.8m/s , de acuerdo con el estándar 55 de ASHRAE. Esta se relaciona con la velocidad exterior y con el alto de las aberturas, mediante la siguiente ecuación:

$$u_{in,m\acute{a}x} = \sqrt{C_1 u_{out,up}^2 + C_2 h \Delta T_{m\acute{a}x} + C_3} \quad (2)$$

donde:

h: altura vertical de la abertura

$\Delta T_{m\acute{a}x}$: diferencia máxima de temperatura horaria que puede haber entre el interior y el exterior durante horas de NV, que se aproximan como la diferencia entre T_{up} y T_{low} .

$C_1 = 0,001$ es el coeficiente de velocidad del viento

$C_2 = 0,0035 \text{ m/s}^2\text{K}$ es el coeficiente de flotabilidad

$C_3 = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ es el coeficiente de turbulencia

Los valores de C_1, C_2, C_3 fueron determinados experimentalmente por Phaff (1980). Entonces, para determinar un límite superior para la velocidad del exterior, se utilizó la ecuación anterior para calcular la velocidad máxima exterior admitida $u_{out,up}$. En caso en que dicha velocidad supere los 13,8 m/s, se toma este valor como límite máximo.

Resumiendo, cuando en una hora determinada la temperatura de bulbo seco se encuentra entre T_{up} y T_{low} , la temperatura de bulbo húmedo es mayor a 17°C y la velocidad de viento es menor a $u_{out,up}$ m/s simultáneamente, se considera que en esa hora existe potencial para realizar ventilación natural. El cálculo se realiza para todas las horas del año y luego se cuenta la cantidad de horas NV (por mes y anual) en que se puede utilizar la ventilación natural. También es usual definir el potencial de ventilación CPNV como un porcentaje del número total de horas del año (o del mes):

$$CPNV = \frac{\sum_{i=1}^n h_{NV,i}}{h_{tot}} \quad (3)$$

$h_{NV,i}$ será igual a 1 si las condiciones en la hora i -ésima del año (o mes) coinciden con los criterios propuestos y 0 si no los cumple.

Efectividad de ventilación natural de un edificio (NVE)

Para evaluar el potencial de ventilación natural de un edificio dado, se puede utilizar la efectividad de ventilación natural definida por Yoon *et al.* (2020). Esta métrica compara el flujo de aire horario del edificio ACH_{avail} con el flujo de aire requerido para compensar las cargas necesarias de refrigeración y ventilación ACH_{req} . La relación entre estas dos tasas de flujo α es sumada para las horas en las que se realiza la simulación y dividida por el total de horas (n), resultando:

$$NVE = \frac{\sum \alpha}{n} \quad (4)$$

donde:

$\alpha = 1$ si $ACH_{avail} \geq ACH_{req}$ o $ACH_{req} = 0$

$\alpha = ACH_{avail}/ACH_{req}$ en los casos restantes

ACH_{avail} es la cantidad de cambios de aire por hora que pueden darse a través de las aberturas, ACH_{req} es la cantidad de recambios de aire por hora necesarios y n es el número de horas totales del período de simulación. Esta ecuación funciona sólo para condiciones de estado estacionario, el valor de ACH_{req} se toma de una simulación previa de energía. La NVE es útil para investigar el diseño de los componentes de un edificio, ya que esta métrica es influenciada tanto por el clima como por los materiales del edificio, la configuración de sus ventanas, ganancias internas, ganancias solares, el tamaño de las habitaciones, etc. Sin embargo, la NVE posee dos limitaciones, una es que ésta depende de los resultados obtenidos de una simulación previa, entonces los efectos de tener distintas opciones para los componentes anteriormente mencionados de un edificio, se observan únicamente luego de realizar dichas simulaciones. La segunda es que funciona sólo para casos de estado estacionario, de modo que no es posible tener en cuenta el efecto de la masa térmica de un edificio, pues este efecto es dinámico. Para resolver estas desventajas Nari Yoon *et al.* (2020) introduce una nueva métrica, la Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural (por sus siglas en inglés NVCE), ésta cuenta con una ecuación

explicita para calcularla, es decir, ya no depende de simulaciones previas, puede trabajar con estados transitorios, haciéndose posible la inclusión de los efectos de la masa térmica de un edificio, poniendo especial foco en las posibilidades de utilizar la ventilación como herramienta para el enfriamiento. En un rango de 0 a 1, la NVCE mide la efectividad del enfriamiento por ventilación natural como recurso en un paso de tiempo. Para un solo paso de tiempo se define como:

$$NVCE_{ts} = \frac{q_{avail}}{q_{req}} \quad (5)$$

donde:

q_{avail} : es el potencial de enfriamiento disponible a través de la ventilación natural

q_{req} : es el potencial requerido para que la temperatura interior pase a un valor deseado de temperatura

A diferencia de la NVE anterior, la NVCE utiliza potenciales de enfriamiento en lugar de recambios de aire por hora, para considerar casos transitorios de forma más conveniente. La NVCE de una determinada duración se define como el promedio de cada una de las NVCE de cada paso temporal:

$$NVCE = \frac{\sum_{n_{ts}} NVCE_{ts}}{n_{ts}} \quad (6)$$

donde n_{ts} es el número de pasos temporales del período de simulación, por ejemplo, para un período de un año con un paso temporal de una hora $n_{ts} = 8760$. Si el q_{avail} no es suficiente como para alcanzar la temperatura interior deseada, debe haber un potencial de calor suplementario. Se puede definir al q_{req} como la suma del q_{avail} más q_{sup} , entonces:

$$NVCE_{ts} \equiv \frac{q_{avail}}{q_{avail} + q_{sup}} \quad (7)$$

Trabajaremos con la siguiente ecuación, incluyendo la definición del calor disponible se tiene:

$$NVCE_{ts} \equiv \frac{-\rho c \dot{V}_{avail} (T_{target} - T_{out})}{q_{req}} \quad (8)$$

donde:

ρ : densidad del aire

c : calor específico del aire a presión constante

$\dot{V}_{avail}$: razón de flujo de aire interior a través de ventilación natural, obtenido por simulaciones, cálculos o medidas

T_{target} y T_{out} : son la temperatura deseada y la exterior respectivamente.

En síntesis, la NVCE representa la fracción de capacidad de enfriamiento que puede proveer la ventilación natural, comparada con la capacidad requerida para alcanzar la temperatura interior deseada.

Si bien el estudio de Nari Yoon *et al.* (2020) continúa con ecuaciones para las temperaturas que ayudan a tener en cuenta el efecto de la masa térmica, desde este punto se propone utilizar simulación computacional en estado transitorio para encontrar los valores de $\dot{V}_{avail}$ y q_{sup} . Para ello, se utilizará EnergyPlus y su interfaz gráfica Open Studio.

Descripción de la vivienda a utilizar

Se seleccionó para el estudio una vivienda social previamente estudiada por Flores y Filippín (2021), del barrio Santa María de las Pampas, ubicado al noroeste de la ciudad de Santa Rosa, en la Pampa. El mismo fue construido por el Instituto Provincial de Vivienda en 2007.

Cada casa presenta dos habitaciones, un living comedor con cocina y un baño, con una superficie total de 50,74 m². La disposición se puede observar en la Figura 2. El volumen de la habitación 1 es de 28,08 m³, el de la habitación 2 es de 25,69 m³ y el del sector cocina-living es de 57,75 m³. En este barrio las casas fueron construidas de a pares, compartiendo una pared, como vemos en la Figura 2, de modo que la casa lindera será tenida en cuenta para las simulaciones a realizarse posteriormente. Las

especificaciones de materiales y sus propiedades térmicas (conductividad, calor específico, densidad y color de la superficie) de cada capa en las paredes, pisos y techos se muestran en la Tabla 1.

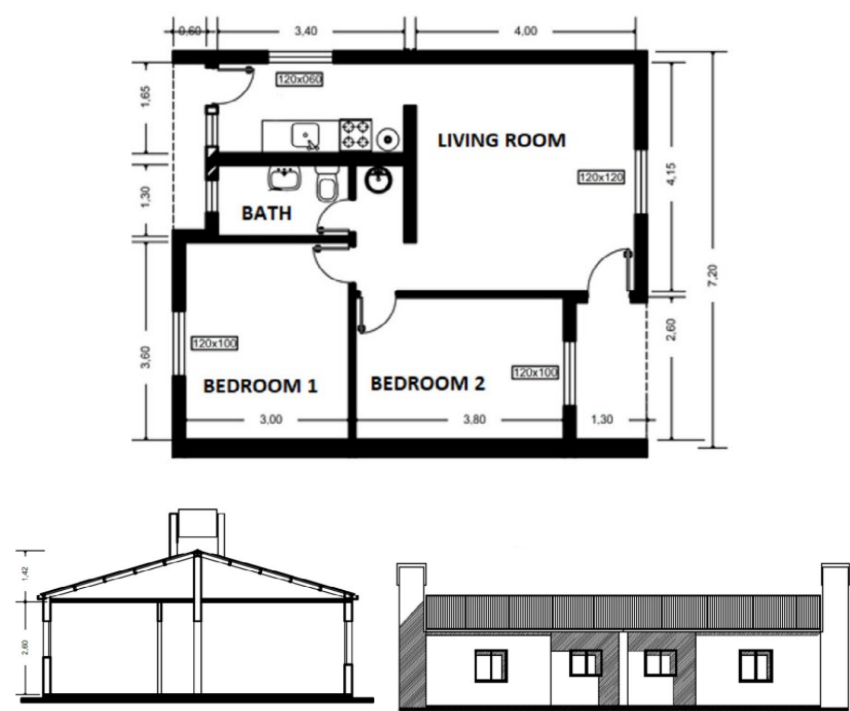


Figura 1: Plano y perfil de la vivienda

Tabla 1: Propiedades térmicas de los materiales de construcción de la vivienda estudiada.

Elemento de la vivienda	Capa (desde el exterior)	Color de acabado de pintura	Conductividad Térmica (W/mK)	Transmitancia térmica (W/m²K)	Calor Específico (J/kg K)	Densidad (kg/m3)
Paredes exteriores	Revoque (0.2 m)	Blanco	1,16	1,47	1085	1800
	Ladrillo cerámico hueco (0.18 m)		0,38		835	1920
	Revoque (0.2 m)		1,16		1085	1800
Paredes interiores	Revoque (0.2 m)	Blanco	1,16	1,76	1085	1800
	Ladrillo cerámico hueco (0.12 m)		0,33		835	1920
	Revoque (0.2 m)		1,16		1085	1800
Techo	Techo metálico (1.5 mm)	Verde	45	0,44	870	8800
	Lana mineral (38 mm)		0,04		700	51
	Cámara de aire					
Ventanas	Madera de pino (19 mm)	Carpintería blanca	0,28	5,82	2805	400
	Vidrio transparente simple (4 mm)		0,9		750	2500
	Carpintería de aluminio con persianas					
Puertas	Puertas metálicas	Blanco	45	5,77	870	2700

Las paredes de la envolvente de este edificio, las paredes interiores y el piso no incluyen aislación térmica, como es usual en Argentina. Las capas constructivas del piso son 0,10 m de espesor de contrapiso de hormigón con agregado pétreo y un acabado de baldosas cerámicas. El techo metálico

incluye 3 mm de lana mineral como aislación térmica y el acabado es una pintura verde. Las ventanas poseen vidrio simple con carpintería de aluminio.

Simulación con EnergyPlus

Con el objetivo de conocer el potencial de ventilación natural de la vivienda descripta anteriormente, se utilizó la métrica $NVCE_{ts}$. Para ello se simuló la construcción con el software EnergyPlus y su interfaz gráfica Open Studio, al cual se le cargaron los datos climáticos de la localidad correspondiente (año típico meteorológico en formato EPW), el diseño de la vivienda realizado en Sketch Up, y las propiedades térmicas y dimensiones de los materiales de construcción de la Tabla 1. Se consideró que las ventanas pueden abrirse entre las 19hs y las 7hs, siempre que la temperatura exterior esté al menos 2°C por debajo de la temperatura interior y no sea mayor que 27°C o menor a 16°C . Se utilizó el módulo “Zone Ventilation Wind and Stack”. Se seleccionaron como variables de salida la temperatura en cada zona y las renovaciones horarias de aire. También fue necesario definir un termostato a la temperatura T_{target} , que se eligió en 24°C , para encontrar la potencia necesaria para llevar la temperatura del interior a la temperatura deseada (q_{req}). Con estos datos es posible calcular las $NVCE_{ts}$ mediante la Ec. (8).

Es necesario aclarar que los resultados de las simulaciones sirven para comparar resultados entre los casos de estudios, y no como valores absolutos; ya que para ello sería óptimo ajustar el modelo físico de las simulaciones con datos reales medidos in-situ.

RESULTADOS

Evaluación del potencial de horas de ventilación natural

En la Fig. 3 se observa que en Salta se pueden aprovechar 4836 horas de ventilación natural, es decir, más de la mitad de las horas totales del año (8760). Climas como el de Rivadavia, Orán o Tartagal no se ven muy favorecidos para utilizar este método, pues cuentan con 3271, 3320 y 3457 horas respectivamente, debido principalmente a que son climas cálidos y húmedos, en los cuales la temperatura de bulbo húmedo en muchos horarios supera los 17°C y la temperatura de bulbo seco es mayor que la T_{up} calculada. La ciudad de Cafayate, por el contrario, presenta un clima seco, con temperaturas no tan altas, por lo que presenta un buen valor de horas NV, con 4857 es la ciudad de la provincia con las mejores condiciones estudiadas anualmente.

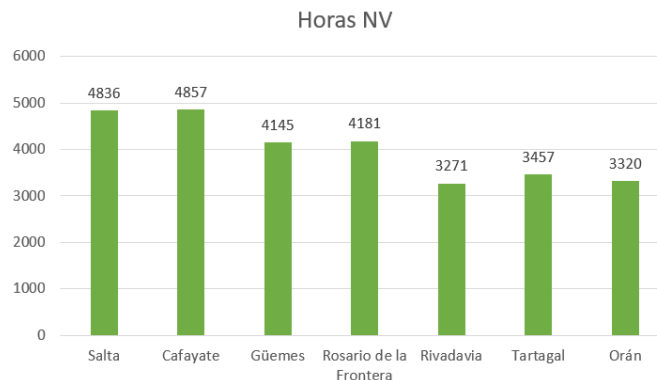


Figura 2: Horas de NV anuales para distintas localidades estudiadas.

Se seleccionaron las ciudades de Salta, Cafayate y Rivadavia para realizar un análisis más profundo y calcular la eficiencia de la ventilación natural en la vivienda social durante los meses de altas temperaturas. Para ello, se tomaron únicamente los meses cálidos (octubre a marzo), en los cuales se podría utilizar la ventilación natural para refrescar los ambientes y se calculó la cantidad de horas de ventilación para cada uno de los meses. La Figura 4 resume los resultados obtenidos. Se observa que, para la ciudad de Salta, octubre es el mes con la mayor cantidad de horas aprovechables, contando con 570 horas de NV de las 744 que posee el mes (casi un 77%), debido a que presenta menores temperaturas que en el resto de los meses, con buenas velocidades de viento y porcentajes bajos de humedad. En febrero se presenta un cambio grande en las horas de NV disponibles, siendo el mes con menos horas de NV aprovechables, pues se cuenta con 181 de sus 672 (~27%), esto se debe a que la temperatura y sobre todo los porcentajes de humedad de la ciudad aumentan en gran medida en estas épocas, subiendo la temperatura de bulbo húmedo y reduciendo el uso de ventilación natural como estrategia viable.

Rivadavia presenta este mismo problema en los meses analizados, si bien octubre alcanza las 347 horas (~47% del tiempo), estas horas decaen y en febrero sólo posee 72 horas aprovechables (~11%), aquí el clima demasiado húmedo supera el límite de temperatura de bulbo húmedo, presentando varios intervalos aledaños al medio día solar en los que se supera el límite de temperatura de T_{up} . Por el contrario, Cafayate con su clima seco a lo largo de toda la temporada, permite contar con grandes cantidades de horas de NV aprovechables, su mejor mes es diciembre con 564 horas (~75 %), el mes que cuenta con menos horas de NV es febrero, con 436 (un 65%) que sigue siendo una buena cantidad de horas de NV.

En resumen, los valores muestran que el total de horas que se puede aprovechar mensualmente se ve considerablemente afectado por los porcentajes de humedad que haya en el ambiente, esto se puede apreciar por como bajan los valores de la ciudad de Salta en los meses de lluvia, de diciembre a febrero, mientras que en climas como el de Cafayate, que es seco, el total de horas CPNV se sostiene relativamente constante, con valores casi siempre mayores a los de la ciudad de Salta. Por último, en climas como el de Rivadavia, continuamente húmedos las horas de CPNV no son suficientes para aplicar esta estrategia, además sus altas temperaturas en los meses de diciembre a marzo dificultan aún más las condiciones de esta localidad, de modo que este tipo de refrescamiento pasivo no es suficiente.

Finalmente, se tomó el mes con mayor potencial de ventilación de Salta (octubre) y se realizó un análisis horario, para conocer si las horas en las que se puede aprovechar la ventilación natural coinciden con el horario nocturno. Considerando únicamente las horas de 19 a 7, se obtuvo que 322 son útiles para NV, un porcentaje muy alto, teniendo en cuenta que bajo estas suposiciones de medio ciclo el total sería de 372 horas nocturnas en el mes, pudiendo aprovecharse aproximadamente el 86 % de las mismas.

De este análisis se puede concluir que el clima de la ciudad de Salta es apto para aplicar estrategias de ventilación nocturna, por las condiciones de saltos de temperatura en sus ciclos diurnos, la velocidad del viento y los porcentajes de humedad que presenta en el ambiente.

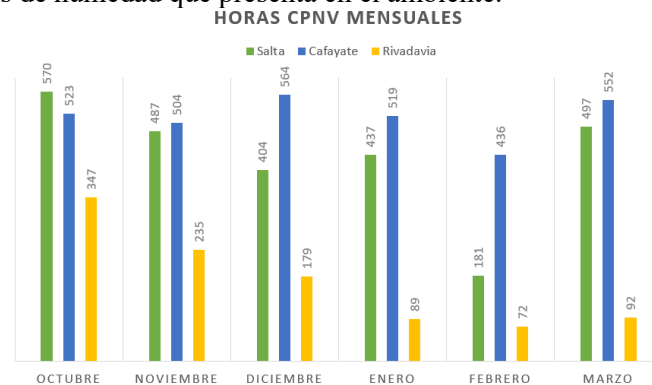


Figura 3: Horas de CPNV de los meses de octubre a marzo de Salta, Cafayate y Rivadavia.

Evaluación de la Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural – NVCE

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos de la cantidad de horas con NVCE=1 en el periodo octubre-marzo para cada zona de la vivienda en Salta, Cafayate y Rivadavia. Se toman solamente las horas en que NVCE=1, es decir, aquellas horas en las que la ventilación natural podría cubrir completamente la necesidad de refrigeración. El caso de NVCE <1 correspondería a horas en que se requiere de refrigeración convencional adicional para alcanzar el confort, lo cual sería incompatible con mantener una ventana abierta para permitir la ventilación.

Se observa en la Tabla 2 que el mayor número de horas con ventilación natural efectiva corresponde a Cafayate y el menor es de Rivadavia. También es notoria la diferencia de horas entre la Cocina-Living y la Habitación 2 en la ciudad de Salta, debido a las características particulares de dirección y velocidad del viento en este lugar.

Tabla 2: Resultados de la cantidad de horas con NVCE = 1 para el periodo octubre-marzo.

	Total de horas con NVCE=1		
Zona/Localidad	Salta	Cafayate	Rivadavia
Cocina-Living	588	806	420
Habitación 1	699	823	391
Habitación 2	738	775	437

La Figura 5 compara los porcentajes de horas con potencial de ventilación natural (CPNV) y los porcentajes de horas con NVCE de las zonas Cocina-Living y Habitación 1 de la vivienda, mes a mes en cada localidad.

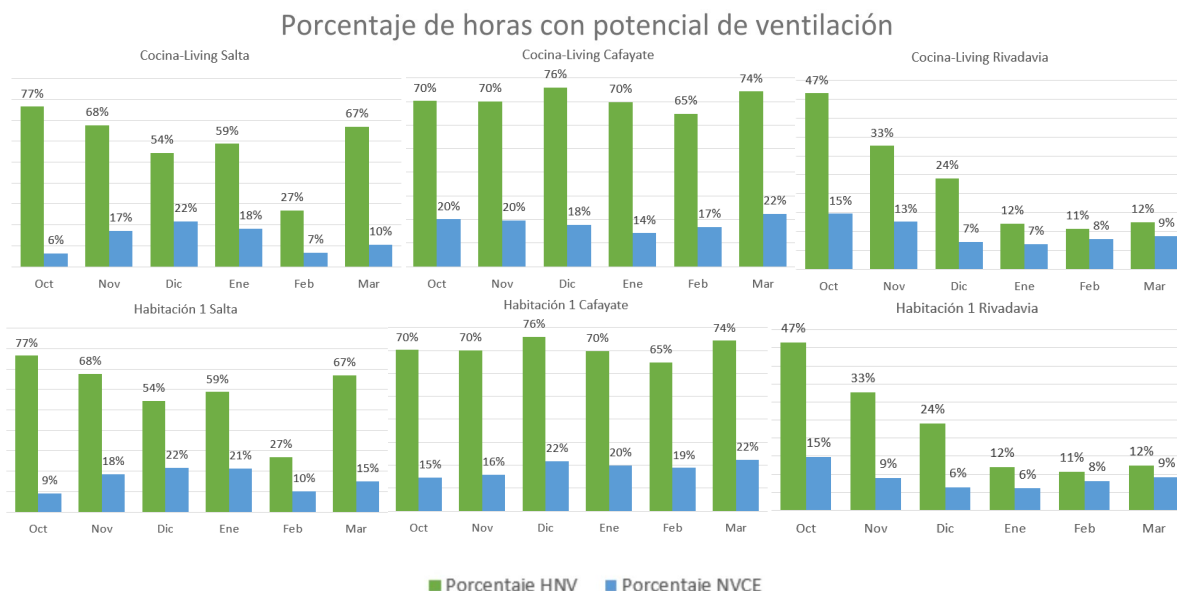


Figura 4: Porcentaje de horas de CPNV (en verde) y Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural NVCE (en azul) de los meses de octubre a marzo en Salta, Cafayate y Rivadavia, para la Cocina-Living y Habitación 1.

En la ciudad de Salta, la zona con los porcentajes más bajos es la Cocina-Living. Ésta es la única zona que presenta dos ventanas y por lo tanto la única que cuenta con ventilación cruzada. Se podría esperar que la zona presente mejores valores, pero hay que tener en cuenta que es también la zona de mayor volumen, por lo que es más difícil realizar recambios de aire por hora en la misma. Para las dos zonas (Cocina-Living y Habitación) se puede observar que octubre, el mes con mejor potencial de CPNV, presenta los menores porcentajes de horas aprovechables en la vivienda. Esto podría deberse a que es el mes con mayores ganancias de energía solar por ventanas (dato corroborado por las simulaciones en EnergyPlus), encontrándose también que la zona con más ganancias es la de Cocina-Living de la vivienda. Ambos motivos explican los porcentajes más bajos de NVCE. Asimismo, analizando las direcciones de los vientos se observa que en octubre se tiene viento proveniente del sureste con temperaturas iguales o superiores a 24°C y velocidades de 10 m/s, que puede afectar a la ventana sur del living. Por último, notamos que en las dos zonas el mejor mes es diciembre, seguido de enero, puesto que en estos meses la ganancia solar por las ventanas disminuye considerablemente y la ventilación natural es más efectiva para reducir la temperatura interior.

En Cafayate, en la mayoría de los casos, se superan los porcentajes de Salta. Para ambas zonas el mejor mes es diciembre y el peor es octubre. Es interesante observar cómo el clima ofrece muy buenas condiciones para ventilación en este mes, que resulta ser el peor, al no poder ser aprovechadas dichas condiciones por la vivienda. Al comparar las condiciones de los meses de octubre y diciembre, se encontró que en la Habitación 1 la ganancia solar por ventanas es mayor en octubre, debido a la orientación norte de la ventana y a la menor altura solar. Esto ocasiona menores valores de horas con NVE. En las zonas restantes las ganancias son similares, pero al comparar sus flujos de aire en el interior, en diciembre se producen casi el doble de recambios por hora que en octubre dentro de la vivienda. Esto

puede deberse a que en diciembre hay una mayor cantidad de horas de viento proveniente del sur y el este, con velocidad algo superior, pudiendo generar mejor ventilación.

Rivadavia es la ciudad con menor cantidad de NVCE de los tres sitios estudiados, lo cual se debe en gran medida a que la temperatura exterior supera la T_{target} de 24°C en muchas horas del periodo. Octubre es el mejor mes para las tres zonas, mientras que enero es el peor, a la par de diciembre. Enero posee una mayor cantidad de horas con temperatura exterior superior a 27°C, límite superior tomado para poder ventilar el interior, lo cual explica su menor cantidad de horas NVCE.

CONCLUSIONES

Luego de recopilar información sobre ventilación natural, analizar los datos arrojados por simulación computacional mediante EnergyPlus para cada sitio, calcular el total de horas de CPNV para las siete localidades y observar los resultados de la cantidad de horas con NVCE en Salta, Cafayate y Rivadavia, se puede concluir que las localidades demasiado cálidas y húmedas como Orán, Tartagal o Rivadavia no son aptas para la aplicación de métodos de refrescamiento pasivo por ventilación natural, pues la cantidad de horas que con la que cuentan para aplicar el método (entre 3270 y 3460) no son suficientes. Climas con menores porcentajes de humedad como el de Salta o incluso más seco como el de Cafayate se ven favorecidos por esta condición y por sus temperaturas más bajas, pudiendo devolver una mayor cantidad de horas aprovechables de CPNV. Aun así, en estos dos últimos sitios al analizar la efectividad de la ventilación nocturna en el interior de la vivienda social, los porcentajes de horas aprovechables bajan en una gran medida, entre 71% y 17% en Salta y 57% y 46%, resaltando la importancia de un buen diseño para este tipo de construcciones, más aún en el contexto global que nos encontramos. En base a lo observado se sugiere estudiar en el futuro la mejora de la ventilación natural del hogar a través del correcto dimensionamiento y ubicación de las aberturas, complementando con extracción activa del aire de ser necesario, además analizar la posibilidad de adicionar masa térmica a los muros de la envolvente para estudiar su impacto y sus posibles mejoras en el confort térmico del interior.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Universidad Nacional de Salta (Proyecto CIUNSA A2489), a la Fundación Williams y a la Red Iberoamericana de Eficiencia y Salubridad En Edificios (IBERESE) de CYTED (<https://www.cytcd.org/node/13398>) por el financiamiento y soporte a las actividades realizadas en este trabajo.

REFERENCIAS

- ASHRAE, Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), DOI:10.1038/sdata.2018.214.
- Camilloni, I. A. (2018). Argentina y el cambio climático. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. Recuperado julio 20, 2023, a partir de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/99889>
- 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).
- de Dear, R. J., y Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, Special Issue on Thermal Comfort Standards, 34(6), 549-561.
- Flores, S., y Filippín, C. (2021). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231, 110576.
- 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 (2014). 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>.
- Rawat N., P. Kumar (2023). Interventions for improving indoor and outdoor air quality in and around schools. *Sci Total Environ*, 858, Article 159813
- 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>.
- 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.