my building is green
A LIFE PROJECT

LIFE my building is green

LIFE17 CCA/ES/000088

Application of Nature-Based Solutions for local adaptation of educational and social buildings to Climate Change

Action: C2.

Deliverable: Planes de Acción para la implementación de fórmulas de ventilación natural inducida y sombreado estacional

Date: 31/12/2020

LIFE my building is green – LIFE17 ENV/ES/000088

Deliverable: **Planes de Acción para la implementación de fórmulas de ventilación natural inducida y sombreado estacional**

Date: **31/12/2020**

Data Project

Project location:	Spain
Project start date:	01/09/2018
Project end date:	31/08/2022
Total budget:	2.854.102 €
EU contribution:	1.697.369 €
(%) of eligible costs:	59,99 %

Data Beneficiary

Name Beneficiary:	AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
Contact person:	Salustiano Torre Casado
Postal address:	C/Serrano,117
Telephone:	34914203017
E-mail:	storre@rjb.csic.es
Project Website:	www.mybuildingisgreen.eu

Data Deliverable Responsible

Name Beneficiary:	FUNDACIÓN CARTIF
Contact person:	Jose Ramón Perán González
E-mail:	pedropombeiro@cm-porto.pt

Índice

1. SUMMARY IN ENGLISH 4
2. RESUMEN EN ESPAÑOL 5
3. RESUMO EM PORTUGUÊS 6
4. INTRODUCCIÓN 7
5. ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS: VENTILACIÓN NATURAL 11
6. CÁLCULO DE ABERTURAS PARA VENTILACIÓN NATURAL 17
7. ESQUEMAS DE VENTILACIÓN NATURAL 20
8. POSIBILIDADES DE MEJORA 26
9. PROTOCOLOS DE VENTILACIÓN 31
10. ANEXOS 39

1. SUMMARY IN ENGLISH

This deliverable includes the studies carried out by the Project in order to define ventilation protocols in classrooms to maintain appropriate thermal comfort inside.

First, the analysis of climatic data from the study areas is presented and how bioclimatic strategies can make possible to adapt buildings for achieving indoor thermo-hygrometric conditions without using active air conditioning systems. In this sense, the main results of the study of applying this methodology to the three schools that participate in LIFE myBUILDINGisGREEN are presented.

Next, a calculation methodology is introduced to define the necessary openings looking for adequate ventilation in different conditions. In addition, different configurations that can be followed depending on the layout of the openings in the classroom are presented.

In an independent section, a laboratory study is presented that assesses the impact of introducing vegetation (for indoor environments or in the air inlet area to the building) to reduce the air temperature (in high temperature situations) depending on the type of vegetation and the irrigation conditions.

Finally, generic ventilation protocols are established for schools seeking to maintain adequate thermo-hygrometric conditions inside. This section presents the tool that is being developed to make the diagnosis in each classroom, support in the calculation of the openings and times necessary for air renewals and to offer recommendations among the solutions that the Project is working on. Furthermore, with this tool, suitable monitoring schemes can be set up to assess their impact.

2. RESUMEN EN ESPAÑOL

En este entregable se recogen los estudios realizados por el Proyecto de cara a definir protocolos de ventilación en las aulas adecuados para mantener el confort térmico en su interior.

En primer lugar, se presenta el análisis de datos climáticos de las zonas de estudio y cómo las estrategias bioclimáticas pueden permitir adaptar los edificios para conseguir condiciones termo-higrométricas en su interior durante el mayor tiempo posible sin necesidad de emplear sistemas activos de climatización. En este sentido, se presentan los resultados principales del estudio de aplicar esta metodología a los tres colegios que participan en LIFE myBUILDINGisGREEN.

A continuación, se introduce una metodología de cálculo para definir las aberturas necesarias buscando una adecuada ventilación en diferentes condiciones. Además, se presentan las distintas configuraciones que se pueden seguir en función de la disposición de las aberturas en el aula.

En un apartado independiente, se presenta un estudio de laboratorio que valora el impacto de introducir soluciones con vegetación (para interior o en la zona de entrada de aire al edificio) para reducir la temperatura del aire (en situaciones de alta temperatura) en función del tipo de vegetación y de las condiciones de riego.

Por último, se establecen unos protocolos genéricos de ventilación para los colegios buscando mantener condiciones termo-higrométricas adecuadas en su interior. En este apartado se presenta la herramienta en la que se está trabajando para realizar el diagnóstico en cada aula, apoyar en el cálculo de las aperturas y tiempos necesarios para renovaciones del aire y para ofrecer recomendaciones de entre las soluciones que está trabajando el Proyecto. Además, con esta herramienta se pueden montar esquemas de monitorización adecuados para evaluar su impacto.

3. RESUMO EM PORTUGUÊS

Esta parcela inclui os estudos realizados pelo Projeto de forma a definir protocolos de ventilação nas salas de aula apropriadas para manter o conforto térmico no interior.

Em primeiro lugar, apresenta a análise dos dados climáticos das áreas de estudo e como as estratégias bioclimáticas podem permitir que os edifícios se adaptem para alcançar condições termostéricas no interior durante o maior tempo possível sem a necessidade de utilizar sistemas de ar condicionado ativos.

Neste sentido, são apresentados os principais resultados do estudo de aplicação desta metodologia às três escolas que participam no LIFE myBUILDINGisGREEN.Em seguida, é introduzida uma metodologia de cálculo para definir as aberturas necessárias procurando uma ventilação adequada em diferentes condições.

Além disso, são apresentadas as diferentes configurações que podem ser seguidas em função do arranjo das aberturas na sala de aula. Numa secção separada, é apresentado um estudo laboratorial que avalia o impacto da introdução de soluções com vegetação (para interiores ou na área de entrada de ar no edifício) para reduzir a temperatura do ar (em situações de alta temperatura) dependendo do tipo de vegetação e condições de irrigação.Finalmente, são estabelecidos protocolos genéricos de ventilação para as escolas que procuram manter condições termoo-higrométricas adequadas no seu interior.

Esta secção apresenta a ferramenta em que estamos a trabalhar para fazer o diagnóstico em cada sala de aula, apoiar no cálculo das aberturas e horários necessários para as renovações aéreas e oferecer recomendações entre as soluções em que o Projeto está a trabalhar. Além disso, com esta ferramenta pode montar esquemas de monitorização adequados para avaliar o seu impacto.

4. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las personas son conscientes del daño que produce la contaminación atmosférica del aire exterior. Esta contaminación, en muchas ocasiones se ve y se huele y las personas con problemas respiratorios la sufren de forma importante. Sin embargo, la contaminación del aire interior de los edificios tiene un efecto aún mayor, en muchas ocasiones, sobre la salud de las personas. La OMS[1], EU[2] y la EPA[3] han estudiado sobre el tema y han reportado datos como que la población pasa de media más de un 80% de su tiempo en interiores o que los niveles de contaminación interior son de 10 a 1000 veces superiores en algunos contaminantes comunes. Por otro lado, también atribuyen la muerte prematura de 4 millones de personas al año o más del 50% de las muertes por neumonía en menores de 5 años (asociadas a partículas inhaladas en interiores).

Un ejemplo se ha constatado con la pandemia de COVID-19 que hemos sufrido. En el caso de la calidad ambiental de los colegios, ésta tiene un papel importante en la salud y el rendimiento académico de los niños, aunque hasta la fecha no se le ha dado la importancia que merece. Los menores pasan gran parte de su tiempo en los colegios y son mucho más propensos que los adultos a verse afectados negativamente por la contaminación del aire interior. Respiran un mayor volumen de aire respecto a su peso corporal y esto lleva a acumular una mayor carga de contaminantes en sus cuerpos. Los estudios científicos demuestran que una mala calidad del aire interior origina problemas de salud como asma, alergias, y también falta de atención y asistencia.

En fisiología respiratoria, un parámetro importante es el volumen expirado por minuto debido a su relación con los niveles sanguíneos de dióxido de carbono. Un volumen por minuto en reposo en humanos es de aproximadamente 5–8 litros. Sin embargo, cuando hablamos de niños hay que tener en cuenta que su tasa metabólica genera mayores demandas de oxígeno, mayores frecuencias respiratorias, tiempos de respiración más cortos y un control térmico menos optimizado que el de los adultos. Todo ello, y algunos factores más, provoca que la calidad del aire y de las condiciones termo-higrométricas les afecten más que a los adultos.

Asimismo, los docentes y resto del personal de apoyo adulto presente en los colegios, también sufren los problemas que pueden originarse y tendrá especial importancia para las personas que puedan tener ciertas patologías previas. Tanto para los niños y niñas como para los adultos, una baja calidad del aire puede provocar ausencias con los consecuentes perjuicios a nivel individual y colectivo.

En España, el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) desde el año 2007 establece la obligatoriedad para los nuevos proyectos de edificación de disponer sistemas de ventilación mecánica en el caso de los colegios. Existen multitud de estudios que muestran que la baja calidad de aire interior[4] (debido a agentes biológicos, diferentes

---

[1] https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health
[2] https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/en/indoor-air-pollution/index.htm
[3] EPA-Environment Protection Agency. https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq
[4] https://www.epa.gov/iaq-schools / de Gennaro, G., Dambruoso, P.R., Loiotile, A.D. et al. Indoor air quality in schools. Environ Chem Lett 12, 467–482 (2014). https://doi.org/10.1007/s10311-014-0470-6 / Madureira, J., Paciência, I., Rufo, et al. Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms. Atmospheric Environment Volume 118, October 2015, Pages 145-156. / Stabile, L., Dell'Isola, M., The effect of

Compuestos Orgánicos Volátiles, material particulado o incluso a contaminantes propios del aire exterior como óxidos de nitrógeno o CO) afecta al desarrollo cognitivo de los niños.

Asimismo, en España, el CTE (Código Técnico de la Edificación) pone de manifiesto exigencias a los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en el documento básico que fija las condiciones generales de diseño de los sistemas de ventilación "DB HS 3 Calidad del aire interior[5]". El DB establece que los edificios deben contar con un sistema de ventilación (híbrida o mecánica) de manera que el aire circule desde las estancias secas a las húmedas, gracias a la disposición de **aberturas de admisión** que comunican la estancia con el exterior, y de **aberturas de extracción** en otras estancias como aseos. Las particiones que separan dichas estancias dispondrán de **aberturas de paso** que permitan la circulación del aire.

El objetivo es garantizar una ventilación adecuada en todas las estancias del edificio, de manera que se aporte un **caudal** suficiente de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado por los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante su uso normal.

El **caudal de ventilación mínimo** exigido por el CTE DB HS 3 para cada estancia de la vivienda es el siguiente:

Caudales de admisión:

- 5 l/s (18 m^3/h) por ocupante aulas.
- 3 l/s (10,88 m^3/h) por ocupante en salas de estar y comedores.

Caudales de extracción:

- 15 l/s (54 m^3/h) en aseos y cuartos de baño.
- 2 l/s (7,2 m^3/h) por m^2 útil en cocinas.
- 0,7 l/s (2,52 m^3/h) por m^2 útil en trasteros y zonas comunes.
- 10 l/s (36 m^3/h) por m^2 útil en locales reservados para almacenamiento de residuos.

Por otro lado, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo español, y cumpliendo el Real Decreto 485/1997 encargado de regular las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo, marca una temperatura máxima de 27 ºC para trabajos realizados en oficina o trabajos sedentarios. En Portugal, la temperatura de confort de referencia son 20ºC para periodo de calefacción y una temperatura de 25ºC para el periodo de refrigeración, con una humedad del 50% (Decreto-Lei n.º 80/2006).

Lo mencionado anteriormente es solamente una muestra de que las instalaciones de los colegios necesitan intervenciones para adecuarlas a los niveles mínimos que se están

---

natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. Science of The Total Environment Volume 595, 1 October 2017, Pages 894-902.

[5] https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf

exigiendo actualmente en otros ámbitos. La mayoría de estos edificios no cumplen con estos criterios porque su construcción es de antes de que se establecieran.

Como se ha mencionado anteriormente, existen muchas publicaciones que se hacen eco de las condiciones en el interior de las aulas y que muestran que en muchas ocasiones los niveles de calidad no serían los más adecuados. En el LIFE myBUILDINGisGREEN se ha evaluado este hecho con las medidas de los sensores de temperatura, humedad y concentración de CO_2 instalados en las aulas. A modo de ejemplo se muestran algunos registros tomados durante una semana calurosa durante septiembre de 2019.

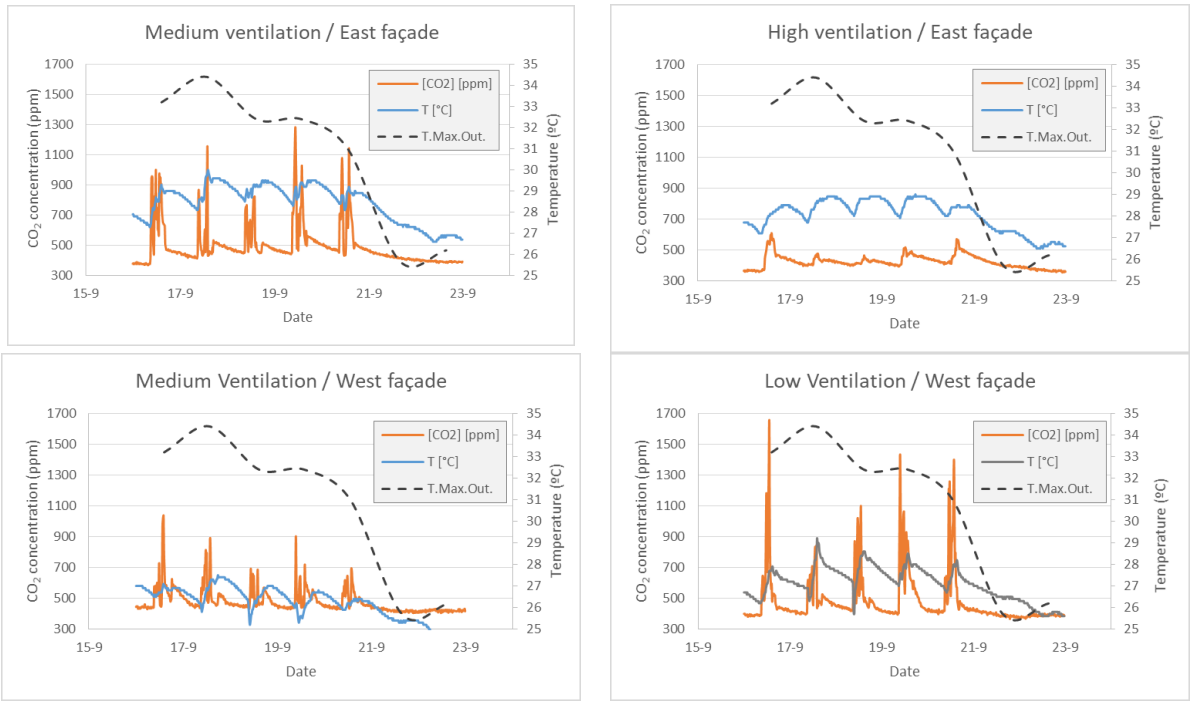


Figura 1. Registros de humedad, temperatura y concentración de CO_2 en algunas aulas del CEIP Gabriela Mistral en Solana de los Barros (Badajoz, España).

Como se puede apreciar en la Figura 1, los perfiles de temperaturas de las aulas son bastante diferentes en función de la orientación. Las aulas con fachadas al este tienen temperaturas más altas que las de la fachada oeste, y superan de forma sistemática los 27ºC, valor que se podría marcar como un máximo de confort térmico. En este colegio en particular, la fachada oeste tiene una fila de árboles a menos de 5 metros de la fachada que la sombrea durante las horas de máxima insolación de la tarde. Como referencia se ha incluido en las gráficas el perfil de temperaturas exteriores (línea discontinua). Esta es una situación que se puede repetir en los colegios durante las épocas de más calor que coinciden con el curso escolar. Dichos periodos serán más o menos extensos fundamentalmente debido a la latitud en la que se encuentren los colegios, cuanto más al sur mayor tiempo (para el hemisferio norte) pero que en zonas del centro de la península Ibérica pueden darse durante muchas semanas entre mayo y octubre.

Asimismo, y también a modo de ejemplo, en la *Figura 2* se muestra el perfil de los registros de temperatura durante los meses de mayo a septiembre del curso escolar. Asimismo, con una línea punteada se señalan los 27ºC de temperatura para resaltar los días que lo superan. Además, se muestran en la parte superior el % de las horas lectivas que superan este valor que se considera como máximo.

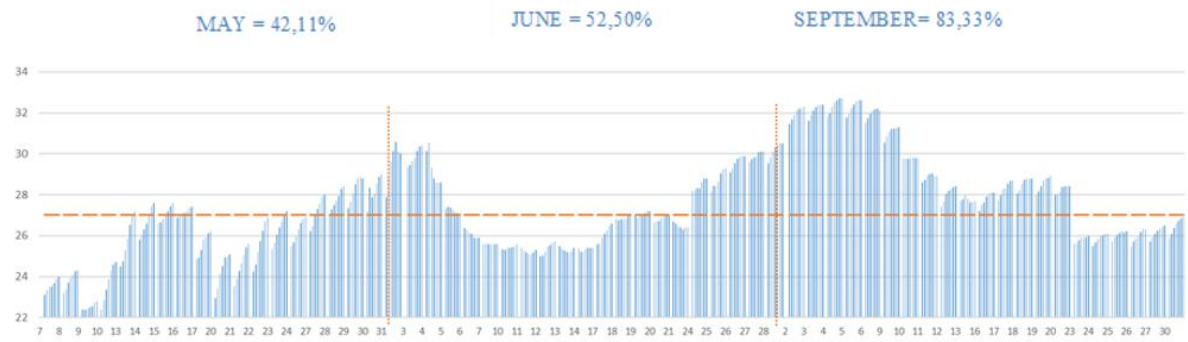


Figura 2. Representación de las temperaturas registradas en el interior de una de las aulas del CEIP Gabriela Mistral de Solana de los Barros (Badajoz) durante 2019.

Por otro lado, y volviendo a la Figura 1, en relación a la concentración de CO_2, que indicaría las condiciones de ventilación del interior de las aulas, se puede apreciar cómo es muy variable entre las diferentes aulas. Después de comentarlo en el colegio, se encontró que los perfiles respondían a la conducta de las profesoras: las profesoras más sensibles a ventilar las aulas mantenían durante el máximo tiempo posible las ventanas abiertas, mientras que las que no estaban tan concienciadas y daban más importancia a otros factores, como el ruido, las mantenían más tiempo cerradas y las concentraciones de CO_2 eran sensiblemente más altas. Asimismo, analizando los datos se encuentra que cuando se tienen menores concentraciones de CO_2, más ventilación, también se reduce la temperatura en el interior del aula como consecuencia de introducir aire exterior, durante el periodo en el que esto es adecuado. En principio se hace a asunción de que una alta concentración de CO_2 indica una renovación del aire interior deficiente y que podría también estar asociada a una alta concentración de compuestos, material particulado o agentes biológicos.

Estas conductas se han visto modificadas con los protocolos indicados para la vuelta a las aulas después del confinamiento debido a la COVID-19. Se ha encontrado que la ventilación ha aumentado en relación al año anterior pero aún existen opciones de mejora. Estos resultados se presentarán en los resultados de la acción C3 que es la encargada de la monitorización del impacto de las acciones del Proyecto.

En general, los valores de humedad dentro de las aulas se mantienen en valores entre el 40 y 60 % durante todo el año. Por lo que sí se mantendrían dentro de las recomendaciones exigidas. Se encuentran también momentos puntuales con valores pico máximos de entre 70 y 80% debido a que se hayan tenido bajas temperaturas y valores pico mínimos de entre el 20 y 30% pero no son significativos. En principio, la alta densidad de personas que hay en las aulas, genera niveles altos de humedad. Por ello, se cree que no sería necesario tener en cuenta la humedad relativa como uno de los parámetros sobre los que intervenir a no ser que se detecten problemas específicos en algún colegio, por valores superiores o inferiores a los recomendados. Ambientes con humedades tanto por encima como por debajo de las recomendaciones tendrían que ser estudiados de forma individual y seleccionar las plantas, los sustratos y los materiales de los contenedores vegetales más adecuados.

En el contexto actual en el que la pandemia de COVID-19 afecta a todo, cuando se piensa en la apertura o cierre de los colegios educativos hay que tener en cuenta todos los riesgos asociados, tantos los de la presencialidad como los de la educación *online*. Los riesgos asociados a la no apertura pueden ser reducir la actividad física de menores, la menor

socialización y peor alimentación y que se puedan producir más situaciones de abusos, explotación y violencia. Por otro lado, se tienen los riesgos de propagación del virus ya que son entornos cerrados, con alta densidad de personas, mucho contacto social y en los que en ocasiones hay también servicio de comedor. Esto provoca que la presencialidad requiera de la implementación de medidas como las mascarillas, la distancia social, la higiene y muy importante, la renovación del aire interior.

Las evidencias muestran que los riesgos tanto de contagio como de sufrir casos graves de la enfermedad son mucho más bajos en menores que en adultos y que además se ha encontrado que tienen tasas de transmisión más bajas. Sin embargo, como no hay que olvidar al colectivo de adultos que trabajan en los centros escolares, las recomendaciones referidas anteriormente tienen que seguir observándose de forma muy estricta.

Valorando los beneficios y los riesgos asociados, la apertura de los centros escolares se cree una buena acción. Sin embargo, ésta tiene que ir acompañada de medidas que aseguren el cumplimiento de las recomendaciones para reducir el riesgo de transmisión del virus. Por otro lado, aunque algunas de ellas puedan ser suavizadas cuando la pandemia se encuentre en niveles controlados, otras pueden ser soluciones que se mantengan para mejorar la calidad del aire interior de las aulas y además mejorar el confort térmico en su interior.

A continuación, se recogen los estudios realizados en LIFE myBUILDINGisGREEN para intentar implementar medidas de ventilación natural en colegios de cara a mejorar el confort térmico, pero también buscando mejorar la calidad del aire interior. Las recomendaciones y los protocolos que se proponen no se limitan al periodo actual, sino que tendrían validez posteriormente porque hay otros muchos factores a mejorar más allá de reducir el riego de transmisión del virus COVID-19.

Las soluciones surgen del análisis de las estrategias bioclimáticas existentes y su combinación son soluciones naturales que pueden facilitar la adaptación de los edificios al cambio climático en relación al reto de mantener el confort térmico y mejorar la calidad del aire en su interior mientras se siguen criterios de sostenibilidad tanto para su implementación como en su uso.

5. ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS: VENTILACIÓN NATURAL

Las estrategias a implementar en el proyecto van dirigidas, como se ha dicho, a mejorar el confort térmico en su interior sin requerir para ello aumentar la demanda energética para refrigeración. No obstante, se analizan las estrategias necesarias para todo el año con objeto de no introducir mejoras para verano que signifiquen un empeoramiento del comportamiento energético del edificio durante el invierno.

Para fundamentar la selección de las estrategias más adecuadas para cada una de las ubicaciones se han usado ábacos psicrométricos donde se plotean los datos climáticos horarios para confort humano, en concreto la temperatura seca (calor sensible) y las humedades relativa y absoluta.

En el mismo gráfico se dibujan las zonas de confort definidas para verano e invierno en función de los parámetros de temperatura y humedad. Los puntos horarios ploteados que se encuentren fuera de dichas zonas indicarán periodos de disconfort. En función de su ubicación en las áreas del gráfico, es posible establecer unas estrategias bioclimáticas que permitan el

acercamiento a las zonas de confort. Estas estrategias vienen definidas en los estudios de Givoni[6] para dichos ábacos.

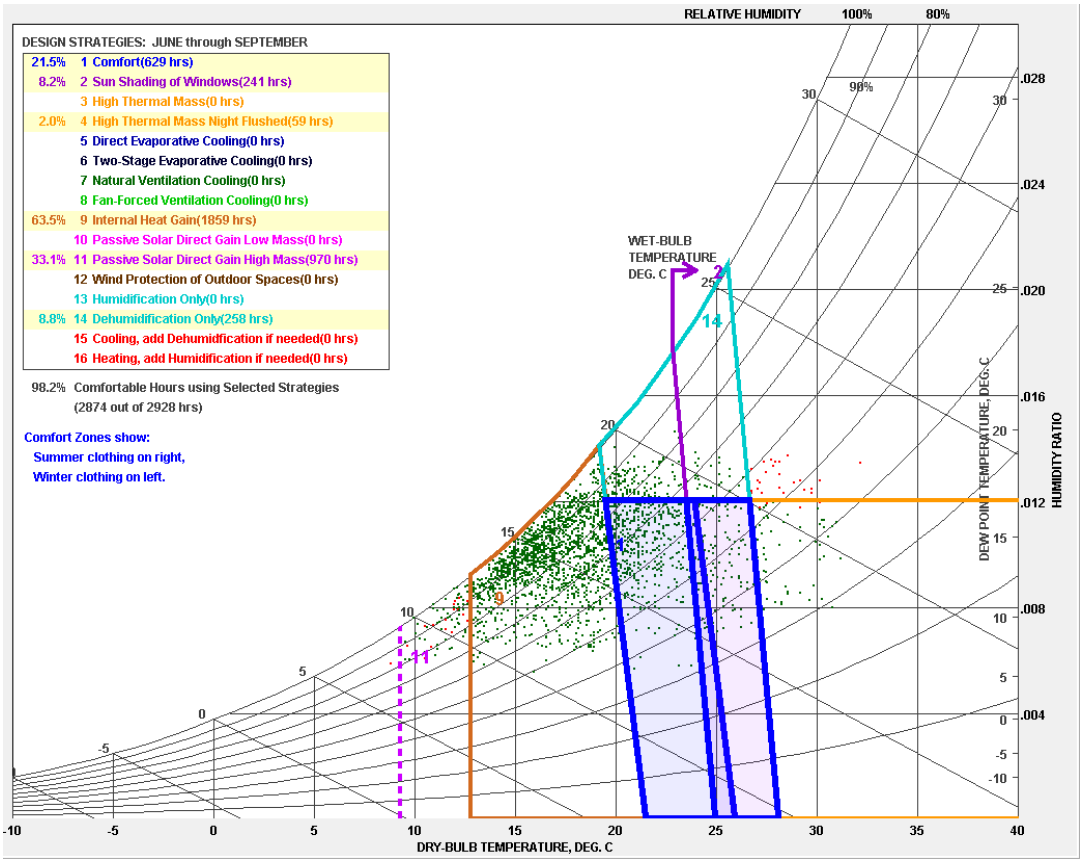


Figura 3. Diagrama psicrométrico con incorporación de las medidas de mejora pasivas más adecuadas durante el verano en la ubicación de Oporto (UCLA, 2008).

Para este estudio se ha recurrido a la herramienta informática *Climate Consultant 6.1* (UCLA, 2008)[7] que facilita las operaciones de introducción de datos climáticos en los ábacos. Se presentan los resultados para las 3 ubicaciones.

De acuerdo con el análisis del diagrama psicrométrico, las medidas pasivas más adecuadas para la reducción de la demanda de refrigeración durante los meses de junio a septiembre en el clima templado y húmedo de Oporto son las siguientes:

- Sombreado de huecos para prevenir el sobrecalentamiento del interior
- Ventilación cruzada
- Control de las ganancias internas
- Aprovechamiento de la inercia térmica
- Deshumidificación

[6] Baruch Givoni 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines. Energy and Buildings, Volume 18, Issue 1, 1992, Pages 11-23, https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K.
[7] http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php

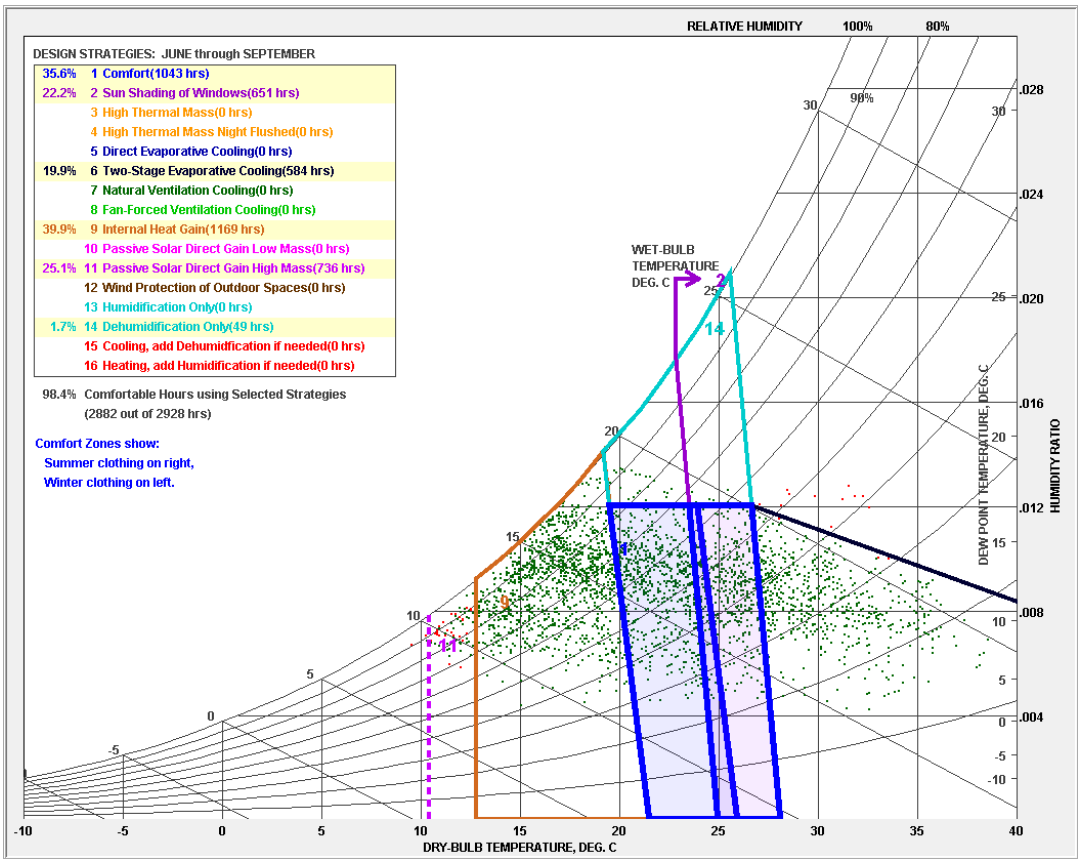


Figura 4. Diagrama psicrométrico con incorporación de las medidas de mejora pasivas óptimas durante el verano para la ubicación de Évora (UCLA, 2008).

Para el caso de EVORA, las medidas aconsejadas serían:

- Sombreado de huecos y espacios exteriores durante el verano
- Ventilación cruzada
- Sistemas de enfriamiento evaporativo
- Gestión de las cargas internas
- Colores claros y cubierta reflectante

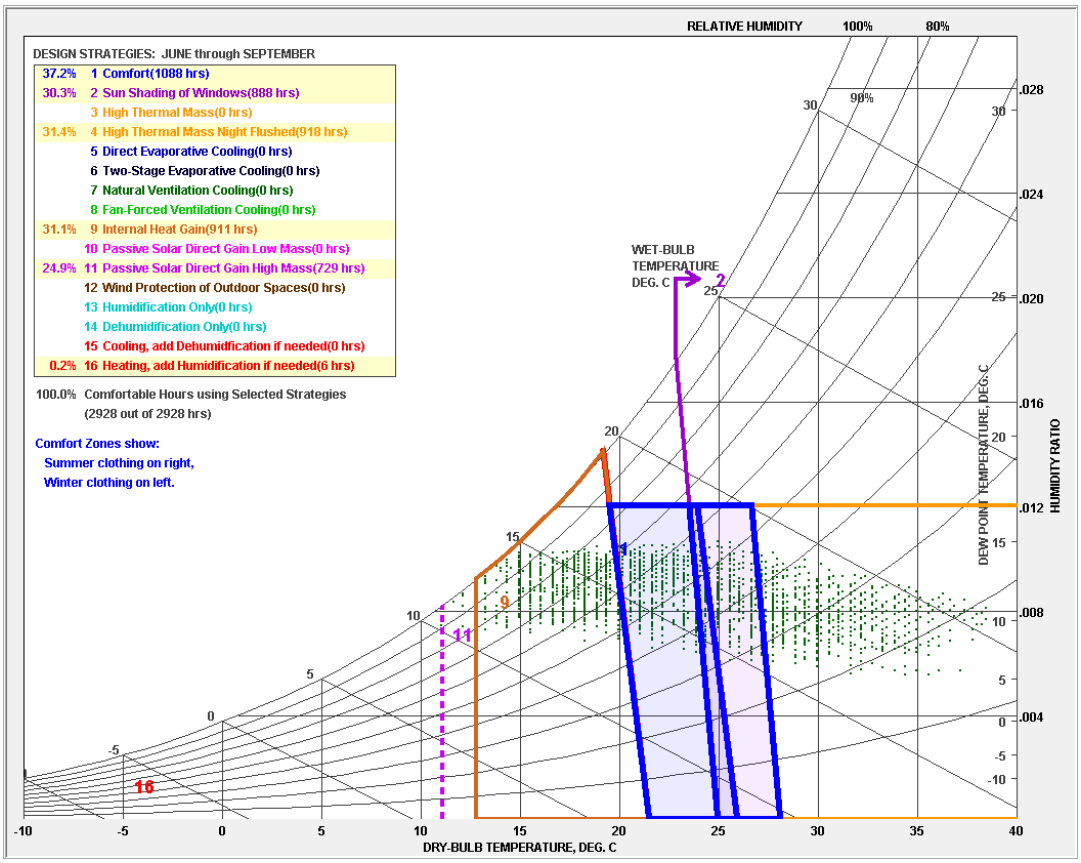


Figura 5 Diagrama psicrométrico con incorporación de las medidas de mejora pasivas óptimas durante el verano para la ubicación de Badajoz (UCLA, 2008).

Ya para el caso de Badajoz, se obtienen las siguientes recomendaciones:

- Cubierta plana reflectante
- Sombreado de huecos (máxima sombra en verano y mínima en invierno)
- Sistemas de enfriamiento evaporativo
- Aprovechamiento de la inercia térmica
- Ventilación nocturna
- Gestión de las cargas internas
- Uso de ventiladores de techo

Como se puede apreciar, las estrategias de ventilación aparecen para las tres ubicaciones, si bien con mayor peso en las de climas cálidos como Badajoz y Évora. Además, en Badajoz se plantean ventilaciones nocturnas (*free cooling*) con el fin de disminuir las temperaturas alcanzadas durante el día y acumuladas en las masas térmicas.

Para el estudio concreto de los impactos de la aplicación de las estrategias bioclimáticas en los edificios, se han realizado estudios energéticos mediante el software *Design Builder (v.6)*[8].

[8] https://www.designbuilder-lat.com/

Los resultados detallados se pueden leer en el artículo[9]: *Selection of Nature-Based Solutions to improve comfort in schools during heat waves.* G. Gómez, B, Frutos, C. Alonso, F. Martín-Consuegra, I. Oteiza, F. de Frutos, M. Castellote, J. Muñoz, S. Torre, J. Fermoso, T. Torres, M.A. Antón, T. Batista, N. Morais. En estado de publicación: *International Scientific Journals by WIT Press.*

A modo de resumen se han extraído algunos de los resultados y las soluciones aconsejadas para cada uno de los casos de estudio analizados. Las soluciones simuladas para cada colegio suponen estrategias bioclimáticas acumulativas en las que la ventilación figura al final de ellas.

CEIP Gabriela Mistral. Solana de los Barros (Badajoz). España.

- S0. Solución en estado actual

- S1: S0 + Solución de sombreamiento de fachadas.

- S2: S1 + Solución de sombreamiento mediante arbolado exterior.

- S3: S2 + Instalación de cubierta verde.

- S4: S3 + Incorporación de la ventilación.

Escola Básica Horta das Figueiras. Évora. Portugal.

- S0. Solución en estado actual

- S1: S0 + Solución de sombreamiento mediante arbolado exterior.

- S2: S1 + Instalación de cubierta verde.

- S3: S2 + Instalación de cableado con vegetación en fachadas Este.

- S4: S3 + Instalación de fachada verde en orientación Oeste

- S5: S4 + Incorporación de la ventilación.

Escola EB1 Mello Falcão. Porto. Portugal.

- S0. Solución en estado actual

- S1: S0 + Solución de sombreamiento mediante arbolado exterior.

- S2.1: S1 + Instalación de cubierta verde.

- S2.2: S2.1 + Cubierta solar.

[9] https://digital.csic.es/handle/10261/231004

- S2.3.: S2.2 + Tratamiento cubierta inclinada

- S3: S2.3 + Instalación de cableado con vegetación en fachadas Este.

- S4: S3 + Incorporación de la ventilación.

Un resumen de los resultados de reducción de temperatura interior tras la simulación de las estrategias planteadas se muestra en la Figura 6.

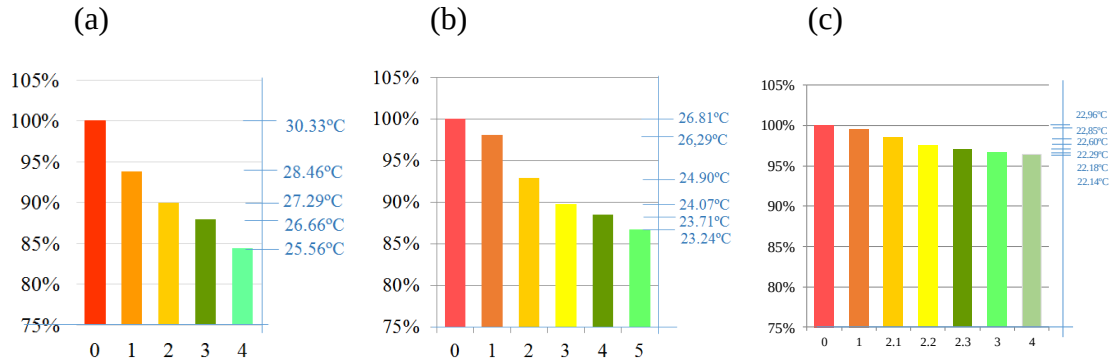


Figura 6. Porcentajes de reducción y temperaturas alcanzadas tras la simulación de las estrategias. Casos de Badajoz (a), Évora (b), Porto (c).

Se puede observar que las reducciones atribuidas a la ventilación, son importantes para los casos de Évora (S4) y Badajoz (S5) por el efecto "*free cooling*"[10] que provocan las ventilaciones nocturnas. En la Figura 7 se muestran los resultados de la simulación desglosados para los distintos meses con mayores temperaturas.

[10] Ventilación nocturna. https://en.wikipedia.org/wiki/Free_cooling

BADAJOZ

Month	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4	
	%	° C less	%	° C less	%	° C less	%	° C less
May	**94,17%**	1,51	**89,38%**	2,76	**87,72%**	3,19	**87,60%**	3,22
June	**93,77%**	1,87	**90,03%**	2,99	**87,99%**	3,60	**85,32%**	4,41
July	**93,10%**	2,27	**89,10%**	3,59	**86,76%**	4,36	**81,48%**	6,10
August	**93,41%**	2,17	**89,51%**	3,45	**87,12%**	4,23	**81,65%**	6,03
September	**94,78%**	1,56	**91,84%**	2,44	**90,04%**	2,98	**86,24%**	4,11

EVORA

Month	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5	
	%	° C less	%	° C less	%	° C less	%	° C less	%	° C less
May	**98,00%**	0,48	**92,11%**	1,90	**88,54%**	2,77	**87,81%**	2,95	**84,87%**	3,65
June	**98,26%**	0,45	**92,74%**	1,89	**89,33%**	2,78	**88,01%**	3,12	**86,17%**	3,60
July	**98,69%**	0,37	**92,79%**	2,04	**89,26%**	3,04	**87,24%**	3,61	**86,60%**	3,79
August	**98,35%**	0,46	**93,44%**	1,82	**90,44%**	2,66	**88,62%**	3,16	**88,02%**	3,33
September	**97,06%**	0,82	**93,26%**	1,87	**91,12%**	2,46	**90,49%**	2,64	**87,46%**	3,48

PORTO

Month	Scenario 1		Scenario 2.1		Scenario 2.2		Scenario 2.3		Scenario 3		Scenario 4	
	%	° C less	%	° C less	%	° C less	%	° C less	%	° C less	%	° C less
May	**99,49%**	0,10	**98,53%**	0,30	**97,71%**	0,47	**97,31%**	0,55	**96,89%**	0,64	**96,89%**	0,64
June	**99,55%**	0,11	**98,22%**	0,43	**97,04%**	0,72	**96,44%**	0,86	**96,16%**	0,93	**95,72%**	1,03
July	**99,54%**	0,11	**98,37%**	0,38	**97,40%**	0,61	**96,92%**	0,72	**96,59%**	0,79	**96,41%**	0,84
August	**99,54%**	0,11	**98,45%**	0,36	**97,58%**	0,57	**97,16%**	0,67	**96,63%**	0,79	**96,46%**	0,83
September	**99,51%**	0,11	**98,63%**	0,32	**97,94%**	0,48	**97,59%**	0,56	**96,81%**	0,74	**96,70%**	0,77

Figura 7. Tabla de porcentajes de reducción y temperaturas alcanzadas tras la simulación de las estrategias. Casos de Badajoz (a), Évora (b), Porto (c).

Para estimar el ahorro energético que podrían alcanzar las distintas estrategias para los meses de más calor, se ha procedido a analizar la reducción de la demanda energética para frio en los 3 colegios como si tuvieran instalado un sistema de climatización. Los datos obtenidos muestran un ahorro mayor para los casos de Badajoz y Évora cuando se aplica la estrategia de ventilación nocturna.

(a) (b) (c)

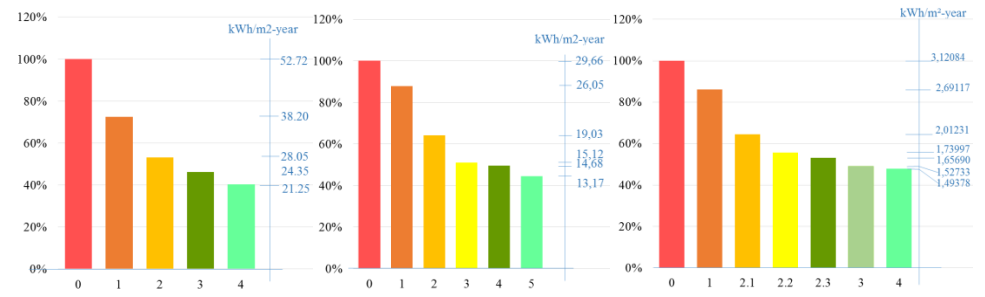


Figura 8. Tasa anual de demanda energética para refrigeración según la aplicación de las estrategias bioclimáticas. (a) Badajoz; (b) Évora; (c) Porto.

6. CÁLCULO DE ABERTURAS PARA VENTILACIÓN NATURAL

En este apartado se presenta un ejemplo del cálculo del área libre de apertura de huecos que habría que disponer para obtener unos caudales de ventilación adecuados según los métodos habituales. La tasa de ventilación se establece por cálculo de renovaciones hora necesarias

según las condiciones climáticas. Este caudal debe ser incorporado en el edificio, a ser posible mediante estrategias pasivas. Es decir, confiando a una ventilación natural.

Los modelos de ventilación natural de los espacios suelen incluir distintas variables en las que juegan un peso importante los gradientes térmicos, los gradientes de presión, las velocidades de viento y orientaciones de impacto sobre las fachadas, las aberturas de las ventanas, y las disposiciones de los huecos en las fachadas (UNE-EN 16798-7 Métodos de cálculo para determinar los caudales de aire en los edificios incluidas las infiltraciones).

Se ha realizado un estudio comparativo de aberturas siguiendo los procedimientos descritos en *ASHRAE*[11] y en el documento del Código Técnico de la Edificación[12]. Se comentan los empleados para el caso de Badajoz.

MODELO ASHRAE. Con viento.

$$A=Q/EW$$

A = Área libre abertura (m^2)

Q = Caudal de diseño (m^3/s). Q = 214,74 l/s = 0,21474 m3/s (Caudal necesario en l/s x persona, ver Tabla 1).

Tabla 1. Comparativa de requerimientos de caudal para centros educativos.

Superficie (m^2)	Altura (m)	Nº alumnos	Caudal (l/s) x persona	*Caudal (l/s) Total*	*CATEGORÍA IDA 3*
54,44	*2,84*	*25*	*8,6*	*214,74*	*RITE*
			2,2	*119,77*	*ASHRAE*
			6,0	*326,64*	*EN 15251 (CatI)*
			4,2	*228,65*	*EN 15251 (CatII)*
			2,4	*130,66*	*EN 15251 (CatIII)*

E = Efectividad de la abertura (0,5-0,6, vientos perpendiculares; 0,25-0,35 vientos diagonales). E = 0,25 (los valores de las rachas de viento en º, oscilan en torno a los 10º, predominantemente provenientes del Norte, por ello se consideran totalmente diagonales respecto a las fachadas estudiadas).

W = Velocidad del viento (m/s). W = 1,4 m/s (valor de la moda, obtenido de los valores de velocidad media de cada uno de los días del período comprendido entre el 1 de mayo de 2019 y el 25 de octubre de 2019. Fuente: AEMET

$$A = 0{,}21474 \,/\, (0{,}25 \cdot 1{,}4) = \underline{0{,}613\ m^2}$$

MODELO ASHRAE. En ausencia de viento (solo gradientes de presión y temperatura).

$$A = \frac{Q}{116\sqrt{h(Ti - To)}}$$

A = Área libre abertura (m^2)

Q = Caudal de diseño (l/s). Q = 214,74 l/s (Caudal necesario en l/s x persona).

[11] https://www.ashrae.org/
[12] https://www.codigotecnico.org/

h = Altura entre abertura de entrada y salida (m). h = 1 m (Considerando que entra por la parte inferior de la ventana y sale bajo la puerta del aula o que sale por la parte superior de la ventana enfrentada).

Ti = Temperatura interior (ºC); To= Temperatura exterior (ºC): ΔT = 7 (Se toma en cuenta la diferencia de temperatura menor entre el exterior y el interior durante las noches –de las 0:00 a las 7:00 h-, de la semana típica de verano).

$$\mathbf{A = 214,74\ /(116\sqrt{(1(7))}) = \underline{0{,}699\ m^2}}$$

MODELO CTE-HS3

Modelo del Código Técnico de la Edificación DB HS: Salubridad. HS3: Calidad de aire interior. Este modelo se usa para sistemas mixtos o híbridos. En este caso se realiza una aproximación para la ventilación natural.

Aberturas de admisión	Máx ($4 \cdot q_v$ ó $4 \cdot q_{va}$)
Aberturas de extracción	Máx ($4 \cdot q_v$ ó $4 \cdot q_{ve}$)
Aberturas de paso	Máx (**70 cm^2 ó 4·q_{vp}**)

(Aberturas de ventilación (en cm^2)

q_v: caudal de ventilación mínimo exigido del local (se toma en cuenta el caudal por m^2. Fuente: ASHRAE).

q_{va}: caudal de ventilación correspondiente a cada abertura de admisión del local (según ASHRAE).

q_{ve}: caudal de ventilación correspondiente a cada abertura de extracción del local (según ASHRAE).

q_{vp}: caudal de ventilación correspondiente a cada abertura de paso del local.

Considerando el mismo valor de caudal mínimo (q) para todas las aberturas, el valor obtenido en caso de sistema de ventilación mecánica o híbrida sería:

$$\mathbf{A = 4 \cdot q = 4 \cdot 0{,}11977^* = \underline{0{,}479\ m^2}}$$

En este caso y como conclusión del análisis, de las tres opciones de cálculo anteriores, la más desfavorable sería la realizada en ausencia de viento, por el método ASHRAE, por lo que podría tomarse por válido el valor de 0,70 m^2.

7. ESQUEMAS DE VENTILACIÓN NATURAL



Figura 9. Imagen que ilustra flujos de ventilación adecuada en un edificio diseñado teniendo en cuenta conceptos de arquitectura bioclimática.

Cuando se piensa en aplicar criterios de arquitectura bioclimática en edificios nuevos, se juega con la orientación del propio edificio y de los huecos del mismo. En ausencia de viento, la ventilación se puede producir por efecto de una diferencia de presiones entre un hueco y otro que se puede conseguir por diferencia de temperaturas o de presión por efecto de la altura. En la Figura 9 se muestra una ilustración de los flujos de ventilación cruzada en un edificio que tiene en cuenta los criterios de arquitectura bioclimática. En este apartado se repasarán los tipos de ventilación con elementos pasivos que existen y se destacarán los que pueden ser empleados en el interior de los colegios

- **Ventilación natural cruzada**. Este tipo de ventilación genera un flujo de aire mediante la apertura de dos o más puntos conectados con el exterior, pero a similar nivel, en paredes opuestas o adyacentes de un mismo espacio. Con esta configuración, se consigue mejorar la calidad del aire, si bien también afecta a la temperatura interior, estando más indicado para climas y estaciones cálidas.

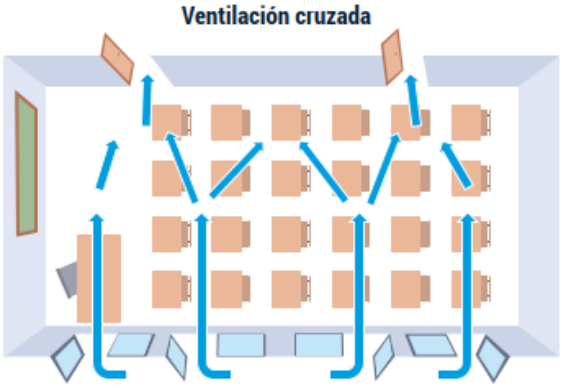


Figura 10. Esquema para ventilación natural de tipo cruzada en un aula tipo[13].

[13] Guía preventiva para ventilación en aulas. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC, Mesura. María Cruz Minguillón, Xavier Querol, José Manuel Felisi y Tomás Garrido. Octubre 2020

Existen otras alternativas de ventilación natural que permiten la ventilación del edificio en su conjunto, pero que requieren de una instalación específica:

- **Ventilación en chimenea**. Se trata de una configuración compleja, en la que una estructura hueca (cubierta ventilada) instalada en la fachada o pared refrigera el aire que entra por abajo y lo lleva hacia arriba. Este sistema de ventilación natural es más complejo, pero es efectivo para la refrigeración convectiva nocturna[14].
- **Enfriamiento evaporativo**. Consiste en hacer pasar una corriente de aire seco y cálido a través de una superficie con agua o húmeda para así aumentar la humedad del aire, de forma que el agua absorbe parte del calor para cambiar de fase líquida a vapor de agua enfriando la masa de aire, aportando humedad y frescor al aire. Este tipo de ventilación está indicada para climas cálidos y secos, y puede usarse en combinación con otros sistemas de ventilación natural, como la ventilación en chimenea[15].

Dada la arquitectura convencional de las aulas, es la ventilación natural cruzada la que mejor encaje tiene en la arquitectura habitual de los centros educativos. Teniendo en cuenta la ubicación de estos puntos de apertura en un aula convencional con ventanales y puerta de acceso al aula enfrentados, la Figura 11[13] muestra 3 opciones de apertura distintas (R2 a R4), frente a la alternativa cero (R1), en la que la estancia está cerrada.

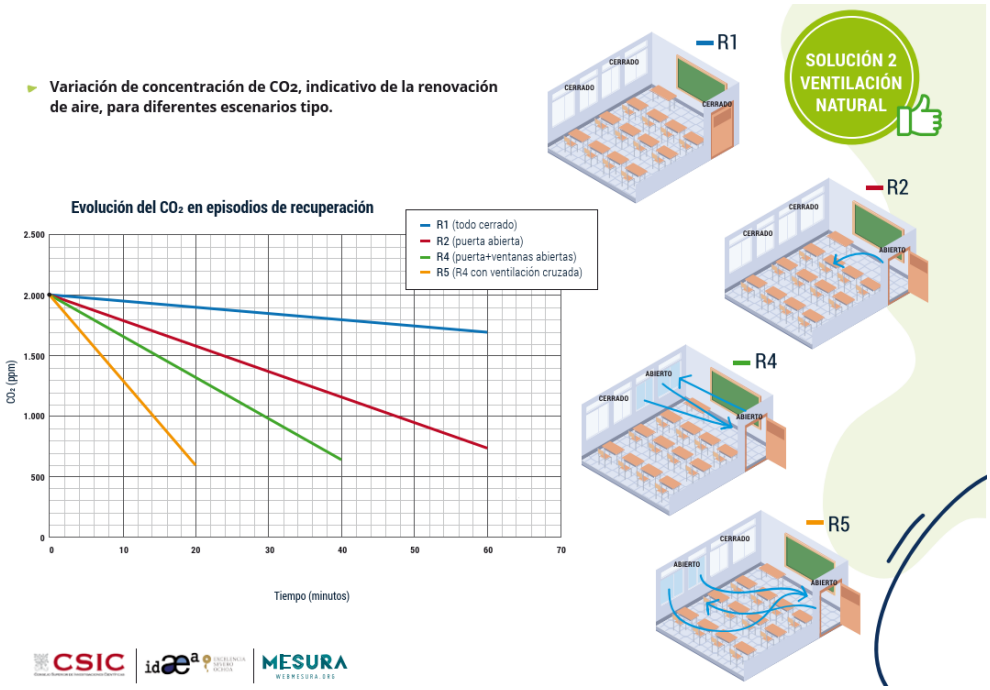


Figura 11. Alternativas de flujos de ventilación y variación de la concentración de CO_2 asociada a cada uno de ellos. Fuente: CSIC.

[14] Shouib Nouh Ma'bdeh, et Al. Simulation study for natural ventilation retrofitting techniques in educational classrooms – A case study, Heliyon. 6, Issue 10,2020, e05171, ISSN 2405-8440.
[15] Sara Mohamed et Al. The impact of a passive wall combining natural ventilation and evaporative cooling on schools' thermal conditions in a hot climate, J. of Building Engineering. 44, 2021, 102624, ISSN 2352-7102.

La concentración de CO_2 en aire es un parámetro comúnmente utilizado para evaluar la eficiencia en la ventilación de interiores[14,16]. Así, una mayor concentración de CO_2 en una estancia es indicativo de una mala ventilación, mientras que al contrario supone que la ventilación es eficiente.

Como puede observarse en el gráfico, la disminución en la concentración de CO_2 ya es significativa en el caso R2 (sólo la puerta abierta), pero mejora notablemente con la apertura de las ventanas. Pero es la opción de ventilación no enfrentada (cruzada, R4) la que obtiene mejores resultados en cuanto a eficiencia de la ventilación en el menor tiempo, en 14 minutos se logra reducir los valores de CO_2 a la mitad.

Sin embargo, existen otros factores a considerar a la hora de valorar la eficiencia del sistema de ventilación, como es el confort térmico. El siguiente análisis muestra el efecto de la ventilación natural cruzada en la temperatura interior de la sala. En la simulación, realizada con la herramienta *Optivent 2.1*[17], se han modelado dos situaciones hipotéticas: el **Caso 1**, en el que el aula se ventila exclusivamente con una ventana abierta y la puerta del aula cerrada, y el **Caso 2**, en el que se crea ventilación cruzada al abrir la ventana y la puerta del aula, estando ambas enfrentadas. A continuación, se muestra una representación esquemática de ambos.

[16] Jørn Toftum, Birthe U. Kjeldsen, Pawel Wargocki, Henriette R. Menå, Eva M.N. Hansen, Geo Clausen, Association between classroom ventilation mode and learning outcome in Danish schools, Building and Environment, Volume 92, 2015, Pages 494-503, ISSN 0360-1323.
[17] http://optivent.naturalcooling.co.uk/OV21/optivent/optivent.php?language=es#close

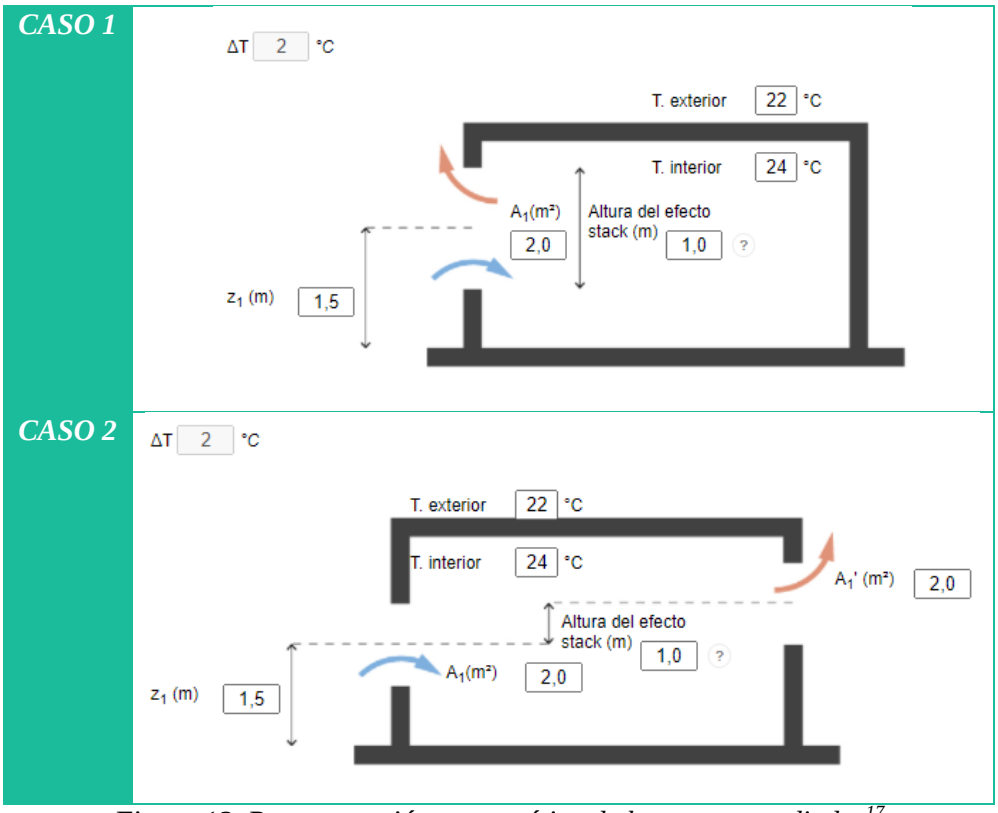


Figura 12. Representación esquemática de los casos estudiados[17]

En ambos casos, los datos de partida fueron:

- Dimensiones del aula: 80 m^2 (8m x 10m) x 3 m
- Aberturas estándar al 50%
- Clase de 30 alumnos, en el mes de junio a las 13h.
- Localización: Latitud compatible con Solana / Évora.
- Velocidad del viento de 3 m/s, temperatura media exterior 32ºC, fachada de ventilación orientada al Este.
- Aula de planta baja, con una pared expuesta y el techo cubierto.

En términos generales, se observa que el calor total extraído al abrir la puerta y crear corriente (**Caso 2**), es sensiblemente inferior al **Caso 1**, habiendo una diferencia total de 0.18 kW, lo que supone una disminución del 3%.

Tabla 2. Resultados comparativos de la simulación: calor total generado[17].

PARÁMETRO	Unidades	Caso 1	Caso 2
Ganancias int. Totales	W/m^2	53.88	53.88
Ganancias solares totales	W/m^2	16.75	14.47
Calor total generado	kW	5.65	5.47

El incremento en la velocidad del aire también es evidente, alcanzándose el mayor caudal de aire en el **Caso 2** con viento exterior (1.09 m^3/s). La siguiente tabla muestra los datos obtenidos en detalle.

Tabla 3. Resultados comparativos de la simulación: flujos de aire[17].

FLUJO DE AIRE	Unidades	Caso 1		Caso 2	
		Sin viento	Con viento	Sin viento	Con viento
Flujo requerido aire fresco	m^3/s	0.30	0.30	0.30	0.30
Requerido para refrigeración	m^3/s	2.35	2.35	2.28	2.28
Alcanzado	m^3/s	0.06	0.25	0.16	1.09

Gráficamente:

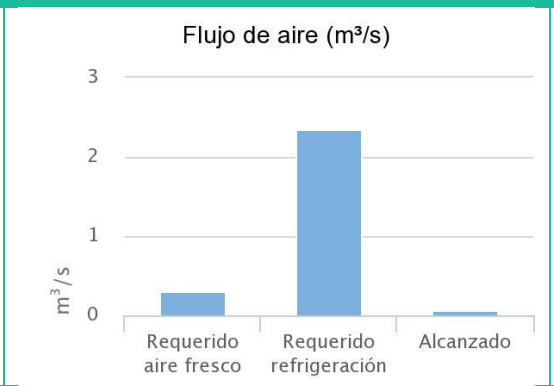
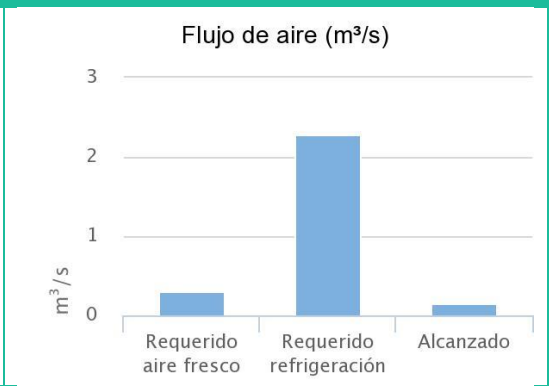
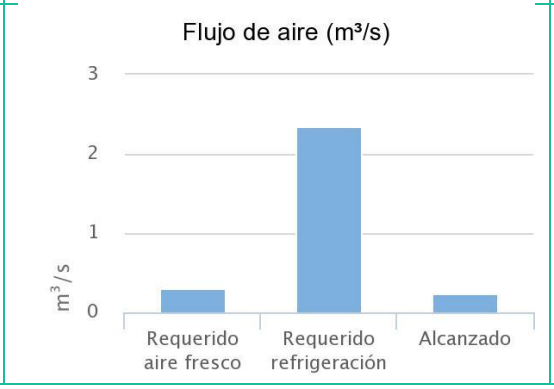
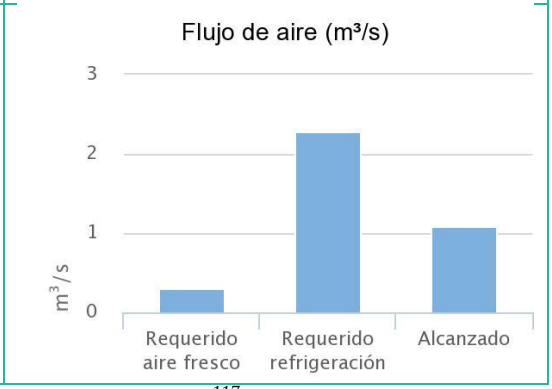
	Caso 1	Caso 2
Sin viento		
Con viento		

Figura 13. Gráficas comparativas de flujos de aire[117].

Las siguientes gráficas muestran los valores enfrentados de Temperatura operativa de la sala, frente a la Temperatura exterior. Las bandas azul y gris delimitan la zona de confort. Como se puede observar, en tan sólo en un caso (Caso 1 con viento) se consigue que los valores de temperatura se encuentren dentro de la zona de confort.

Caso 1	Caso 2

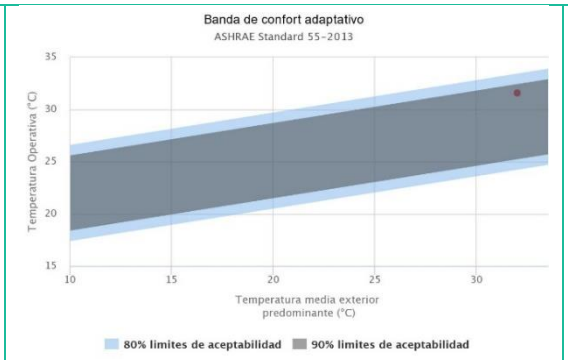
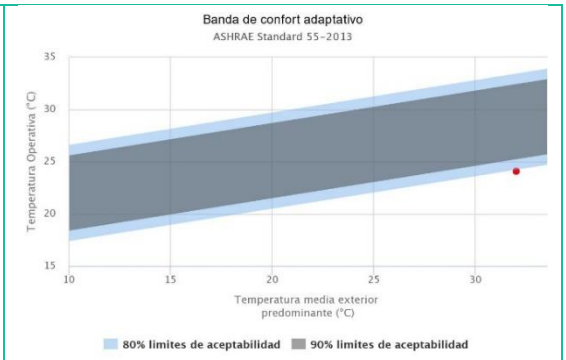
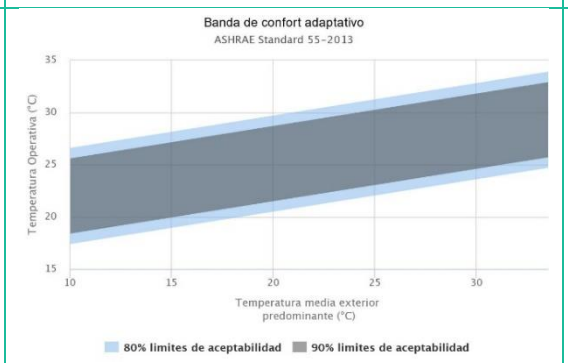
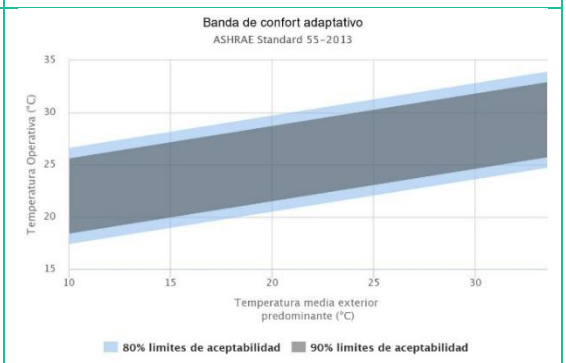
Con viento		
Sin viento		

Figura 14. Gráficas comparativas de confort adaptativo[117].

En conclusión, si bien la ventilación cruzada en el aula es un método efectivo en la reducción del CO_2 en la sala y, por tanto, en la renovación del aire, no basta por sí sólo para lograr una temperatura adecuada. En las localizaciones estudiadas, hacia final de la primavera o principios de verano, serían necesarias estructuras o mecanismos adicionales, como las que promueve LIFE myBUILDINGisGREEN que logren moderar la temperatura interior a unos valores compatibles con el confort térmico.

8. POSIBILIDADES DE MEJORA

En LIFE myBUILDINGisGREEN, como ya se ha comentado anteriormente, además de considerar en las estrategias bioclimáticas la renovación del aire interior empleando el aire exterior cuando las condiciones termo-higrométricas lo aconsejan, hemos incluido la utilización de las soluciones con vegetación para mejorar el confort térmico en las aulas.

En este sentido, se ha realizado una experiencia de laboratorio, que sirvió para valorar la posibilidad de emplear superficie verde en el interior del edificio o en las áreas de entrada del aire al edificio para reducir la temperatura y regular la humedad del mismo.

En primer lugar, se diseñó una simple instalación que permitía el control de la temperatura y el flujo de aire a la entrada a una cámara en la que se introducía la parte vegetal. En la Figura 15 se muestra la cámara de ensayos con los indicadores de temperatura y el rotámetro empleado en el estudio.



Figura 15. Instalación experimental empleada en el estudio.

Para mantener la temperatura de entrada estable se introdujo todo el sistema en una sala termostatada a 30 ºC y el aire, proveniente de un compresor, antes de entrar a la cámara se hacía circular por la misma para alcanzar la temperatura de la cámara. La temperatura de entrada a la cámara se medía en la conducción antes de entrar en la cámara. Además, se medía la temperatura interior de la cámara para estudiar el impacto de la vegetación. Las condiciones experimentales han sido deliberadamente modificadas para identificar el posible impacto y exacerbar las diferencias entre unos sistemas y otros. Las proporciones de cantidad de plantas y volumen de cámara están muy ampliadas en relación a lo que se podría instalar en un aula convencional según los estándares y gustos actuales y los caudales de aire empleado son muy

superiores a los que se pueden conseguir mediante ventilación natural para la mayoría de las ocasiones. Se quiere hacer ver estos aspectos para poner en situación el estudio.

Después de una serie de ensayos previos para fijar los parámetros a emplear en el estudio, se definieron las siguientes condiciones experimentales comunes a todos los ensayos.

Tabla 4. Condiciones experimentales de los ensayos a llevar a cabo.

Parámetro	Valor
Caudal de aire	10 - 15 - 20 litros/min
Volumen cámara	3L
Masa vegetal	20 g
Masa agua riego previo ensayo	40g
Tipo de mezcla interior	Mezcla completa mediante ventilador interior

Se realizaron varios ensayos para estudiar el procedimiento y para encontrar las condiciones de operación que permitiesen apreciar el impacto de la vegetación. En la Figura 16 se muestra la evolución de la temperatura y la humedad en la entrada y en el interior de la cámara. Como se puede apreciar los perfiles de temperatura son muy similares. Solamente se aprecia que la temperatura interior nota menos las variaciones térmicas de la sala termostatada. Los perfiles de humedad muestran la diferencia entre el aire de llegada, con humedades entre 25 y 30% y la humedad del interior de la cámara donde se nota el incremento de temperatura y la humedad relativa baja a valores entorno al 7%.

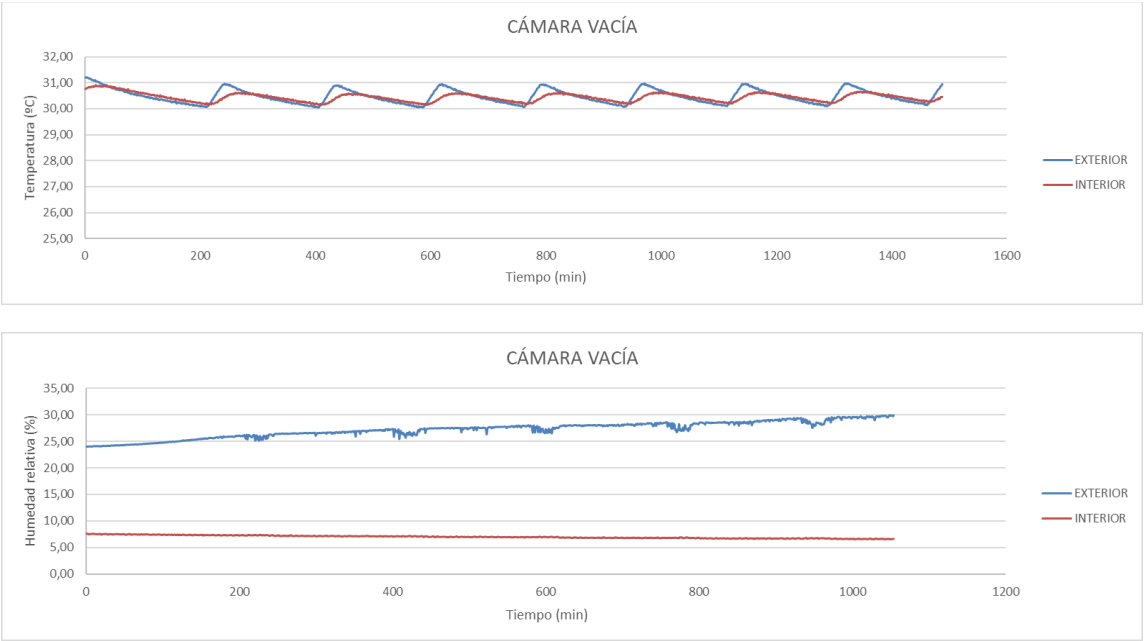


Figura 16. Gráficas de evolución de la temperatura y humedad en la entrada y la salida (interior) de la cámara vacía.

Para estudiar el impacto del tipo de vegetación que se puede emplear en soluciones en estas zonas de transición, se seleccionaron tres tipos de vegetación que se puede emplear. En primer lugar, una planta convencional en un contenedor vegetal, una matricaria (*Tanacetum parthenium*) en tiesto de medio litro de volumen de sustrato y 12 cm de altura de planta. El segundo sistema empleado es un trozo del sistema mBiG WTray con festuca (*Festuca gautieri*). Por último, se empleó en el estudio también un tipo de musgo (*Syntrichia Ruralis*).

En la Figura 17 se muestran las gráficas de evolución de la temperatura y la humedad a la entrada y en el interior de la cámara con musgo y un caudal de aire de 10 L/min. Como se puede apreciar se consigue reducir de forma importante la temperatura de la cámara (más de 4ºC en momento del máximo) mientras la vegetación tiene humedad. Cuando se seca, la capacidad de evapotranspiración se reduce de forma importante y desaparece la capacidad de reducción de temperatura.

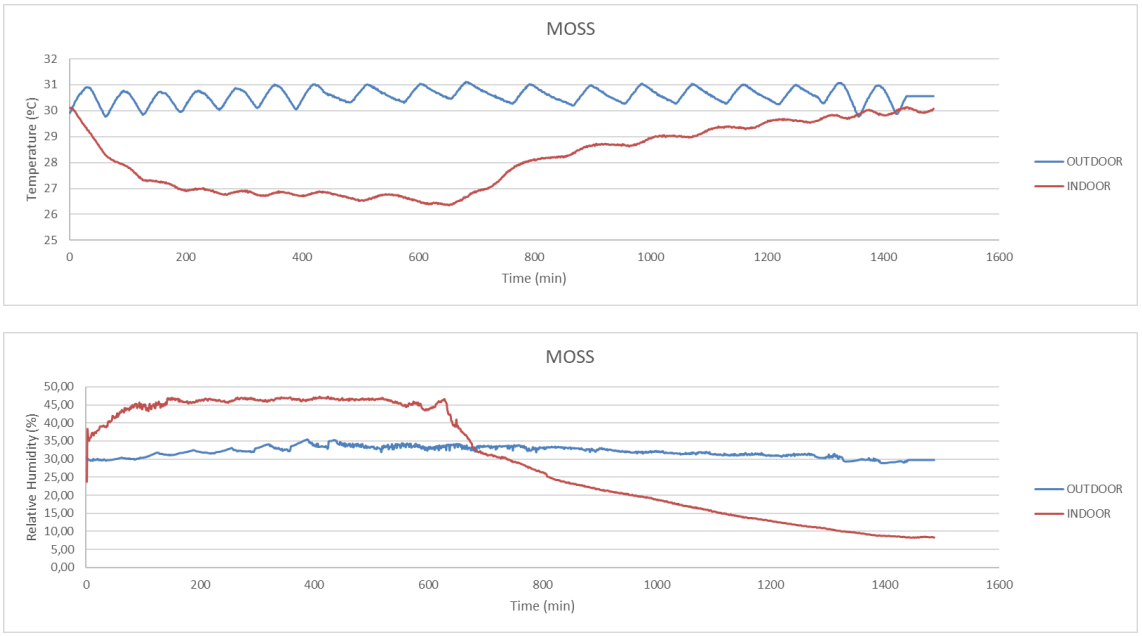


Figura 17. Gráficas de evolución de temperatura (arriba) y humedad (abajo) de la experiencia realizada con musgo y un caudal de aire de 10L/min.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante los ensayos. Como se puede apreciar, la introducción de vegetación conduce a una reducción de la temperatura y a un aumento de la humedad relativa del aire del aire en una estancia.

Tabla 5. Resumen de los resultados obtenidos durante los ensayos.

						Dif. promedios		Dif. máximas	
	Caudal (L/min)	**T entrada (ºC)**	**H entrada (%)**	**T cámara (ºC)**	**H cámara (%)**	**T (ºC)**	**H (%)**	**T (ºC)**	**H (%)**
Cámara vacía	10	30,43	26,98	30,49	6,23	0,06	-20,8	0,37	25,46
Wtray	10	30,72	35,25	29,09	24,60	-1,6	-10,7	1,86	13,14
Wtray	15	30,74	35,14	28,62	25,44	-2,1	-9,7	2,38	28,38
Wtray	20	30,79	35,01	28,62	25,44	-2,2	-9,6	2,41	28,25
Musgo	15	30,29	31,15	26,40	37,48	-3,9	6,3	4,44	22,33

Tabla 5. Resumen de los resultados obtenidos durante los ensayos.

						Dif. promedios		Dif. máximas	
	Caudal (L/min)	**T entrada (ºC)**	**H entrada (%)**	**T cámara (ºC)**	**H cámara (%)**	**T (ºC)**	**H (%)**	**T (ºC)**	**H (%)**
Musgo	20	30,44	31,79	26,49	34,37	-3,9	2,6	4,41	26,10
Musgo	10	30,58	33,08	26,79	45,13	-3,8	12,1	4,22	23,85
Matricaria	10	30,56	27,41	29,36	16,10	-1,2	-11,3	1,36	16,99
Matricaria	15	30,56	30,50	29,16	15,95	-1,4	-14,6	1,66	18,42
Matricaria	20	30,64	26,82	28,82	15,98	-1,8	-10,8	1,92	14,88

En la tabla anterior se puede observar cómo, para todas las especies, cuanto mayor es el flujo de aire mayor es la reducción de la temperatura que se puede obtener, se consigue una mayor evapotranspiración. En principio, esta reducción alcanzará un máximo a partir del cual el sistema ya no será capaz de enfriar lo suficiente todo el aire que entra.

En relación a las especies, de las estudiadas, la que mejor funciona es el musgo (*Syntrichia Ruralis*) de forma destacada. Este hecho puede estar asociado a la alta proporción de superficie foliar en relación al total de la planta y a que son especies con gran cantidad de estomas y baja regulación de su apertura en relación a la temperatura del medio (en general los mantienen mucho tiempo abiertos). A continuación, se tiene la festuca (*Festuca gautieri*) con entre 1,6 y 2,2 ºC de reducción. Es una especie herbácea, cuyos valores son casi la mitad que los del musgo. Por último, se tendría la matricaria (*Tanacetum parthenium*), la especie que presenta una menor superficie foliar en relación a la totalidad de la planta. En la Figura 18 se muestran imágenes de las especies empleadas en el estudio.



Figura 18. Especies vegetales empleadas en el estudio.

Como conclusión principal del estudio, extraemos que la introducción de vegetación en las aulas o en zonas de acceso a las mismas en el interior del edificio, permite reducir la temperatura del aire interior. Por supuesto, la relación entre el volumen de la estancia y la superficie o cantidad de vegetación introducida es un factor determinante en la cantidad de energía captada por el sistema y por lo tanto en la temperatura de la estancia. Este estudio está

limitado a las condiciones experimentales establecidas y no se pueden extrapolar los valores absolutos recogidos.

Para optimizar el uso de la vegetación en interiores, una vez que se tienen calculadas las aberturas necesarias, será necesario evaluar la zona principal de entrada de aire en función de las condiciones de vientos predominantes y de la diferencia de temperatura entre las fachadas de apertura de huecos. De esta forma, lo conveniente será situar los elementos con vegetación en las zonas de entrada del aire al edificio o aula para que su impacto sea mayor. Además, como se ha visto, es muy importante mantener unos niveles de riego de la vegetación para asegurar la evapotranspiración y el mantenimiento de la misma. Aunque no se ha estudiado el impacto de la vegetación a temperaturas bajas (por debajo de la mínima de confort) por si se pudiese obtener un impacto positivo, se cree que este sistema es interesante fundamentalmente para épocas de calor y tiene un mayor impacto a temperaturas altas. Las estomas de las hojas se abren más cuanta mayor sea la temperatura (dentro de unos límites y seleccionando las especies adecuadas) y producen una mayor evapotranspiración.

Las NBS que se van a instalar en los colegios (arbolado, cubiertas verdes, fachadas verdes…) también impactan en el confort térmico interior, complemento de la ventilación. En la Figura 6 se muestra como las NBS en cada colegio ayudan a reducir las temperaturas junto con la ventilación.

9. PROTOCOLOS DE VENTILACIÓN

En este apartado, en base a la información anterior se ha definido un protocolo de ventilación para las aulas buscando mantener las condiciones termo-higrométricas dentro de unos niveles de confort térmico para sus ocupantes y unas condiciones de calidad de aire mínimas.

Hay que mencionar que las condiciones óptimas se encontrarían en rangos mucho más estrechos que los empleados, pero estas condiciones solamente se podrían asegurar durante un periodo amplio del horario escolar empleando medidas activas como son los equipos de acondicionamiento de aire. Teniendo en cuenta que instalar equipos de este tipo en todas las aulas no se considera una medida que se deba extender y conociendo la situación actual de las aulas, se cree más adecuado implementar soluciones como las referidas anteriormente, tanto desde un punto de vista económico como de sostenibilidad.

Como valores de referencia a mantener dentro de las aulas, suponiendo una actividad sedentaria en las mismas, se establece un rango de temperaturas entre 14 y 25ºC y de humedades relativas entre 30 y 60%. Por otro lado, en relación a los valores de CO_2, y después de la irrupción de la pandemia del COVID-19, se habla de mantener como máximo entre 700 y 800 ppm. De esta manera se reduce el riesgo (por debajo del 1%) para un aula tipo, de que el aire respirado por una persona pueda se inhalado por otra.

Existe una gran casuística en cuanto a la tipología de aulas y contextos. Por ello, en primer lugar se establece un protocolo previo de situación para definir una mejor solución. Hay que tener en cuenta que, como en la mayoría de las ocasiones no existirá la posibilidad de automatizar las aperturas, tendrá que haber personas encargadas de realizarlas. Por ello, se considera necesario estudiar el entorno buscando reducir al mínimo el número de intervenciones necesarias para realizar la ventilación, generando la mínima molestia.

- Disponer de los datos climáticos de la zona. En especial, serán necesarios los perfiles de temperatura.
- Analizar el perfil de temperaturas, humedades y concentraciones de CO_2 del interior del aula que se tienen habitualmente. Para ello se pueden emplear los registros de los medidores de los que disponen muchas aulas durante una semana que pueda ser representativa. Cuanto más largo sea el periodo analizado mejor visión se puede tener de la situación de partida.
- Determinar para cada aula:
    - Información básica sobre el aula que incluya orientación, un plano con dimensiones, situación de los puestos, huecos y sus dimensiones.
    - Temperatura promedio del aula durante el periodo lectivo. Información relevante para establecer prioridades en el centro educativo en caso de ser necesario.
    - Momento de la mañana en el que se alcanzan valores de temperatura interior por encima de los 25 ºC en cada aula. El rango de temperaturas para actividades sedentarias está entre los 14 y los 25ºC.
    - Temperatura y humedad inicial y final del periodo lectivo tipo.
    - Perfiles de la concentración de CO_2 durante el periodo lectivo y valores máximos junto con los momentos del día a los que se producen.

PROTOCOLO para mejorar el confort térmico y la calidad de aire interior en colegios

LIFE myBUILDINGisGREEN considera de gran importancia el confort térmico y la calidad del aire interior en los colegios. Dentro del proceso de adaptación de los colegios al cambio climático, uno de los aspectos claves es asegurar que las condiciones en su interior sean las adecuadas para llevar a cabo la activad lectiva y lúdica que se espera. Los modelos climáticos predicen, como ya se está viendo, un aumento importante de la temperatura media y de la intensidad y duración de las olas de calor en el sur de Europa. Ante este escenario, parece imprescindible estudiar cómo evitar el calentamiento del interior de los colegios durante las épocas de más calor que coinciden con el periodo lectivo. La instalación de sistemas activos para modular las condiciones ambientales como sistemas de aire acondicionado no puede ser recomendada existiendo otras posibilidades pasivas que conjugan los criterios de arquitectura bioclimática, el empleo de soluciones basadas en la naturaleza (que además tienen otros beneficios asociados) y otras medidas sin un gran impacto ambiental ni aumento del consumo energético.

En principio, los procedimientos que se proponen pueden conducir a diagnósticos que se podrían realizar con el simple conocimiento del terreno. Sin embargo, se ha creído necesario sistematizar en cierta forma la identificación de los problemas, la proposición de las soluciones y unos indicadores de cálculo sencillo que ayuden a valorar el impacto de las acciones llevadas a cabo. LIFE myBUILDINGisGREEN está trabajando en una herramienta para poder asistir a los interesados en la selección de prácticas y medidas para mejorar el confort térmico y la calidad del aire en el interior de los colegios.

La herramienta está aún en desarrollo y se completará al final del proyecto. Se validará con las intervenciones realizadas en los colegios con NBS prototipos y cuando se hayan ensayado los protocolos de ventilación propuestos. La herramienta se trata de un archivo de Excel que permitirá introducir la información básica comentada anteriormente sobre cada localización. Con esta información, y en una serie de hojas de resultados, mostrará el diagnóstico para cada uno de los parámetros a evaluar (temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2) y guiará al usuario sobre las recomendaciones que desde LIFE myBUILDINGisGREEN se hacen para adaptar los edificios al cambio climático y asegurar unas condiciones de confort térmico y de calidad de aire adecuadas. Asimismo, esta herramienta se puede emplear posteriormente de cara a valorar el impacto de las actuaciones llevadas a cabo.

A continuación, se muestran se muestran algunas imágenes de la herramienta en su versión beta actual. Es muy posible que algunas de ellas sean modificadas en la versión final que se publicará como resultado del proyecto.

En la Figura 19 se muestra una imagen de la pantalla inicial que sirve para recoger información básica inicial, incluyendo los registros del aula en cuestión. Desde esta pantalla se podrá acceder también al resto que servirán para realizar los diagnósticos y para estudiar las recomendaciones.



Figura 19. Imagen de la hoja inicial de la herramienta.

Una vez introducidos los registros del aula te permite visualizar gráficamente como es la evolución de cada uno de los parámetros y valorar visualmente los registros que se quedan fuera del rango de los valores aconsejados. En la Figura 20 se muestra una imagen de la hoja de la herramienta en la que se pueden visualizar los perfiles de CO_2 registrados y un resumen de los indicadores calculados para valorar el estado de la calidad del aire. La evaluación la realiza mensualmente así, si se meten los registros de todo un año, se podrá tener una visión completa de cuando se concentran los posibles problemas de calidad del aire en el aula. Además de indicar los valores medios, máximos y mínimos, indica el número de registros que han superado los valores recomendados y el % de ellos. Por defecto, se ha establecido que, si los registros con una concentración superior a 750ppm superan el 20% de las medidas, se considera que es necesario tomar medidas. Este valor del 20% se puede modificar por si el usuario quisiera emplear otro valor.

Existen dos hojas similares para la temperatura y la humedad que permiten realizar un diagnóstico similar para estos parámetros. De esta manera resulta sencillo identificar los meses en los que se producen los episodios de disconfort térmico o con mala calidad del aire.

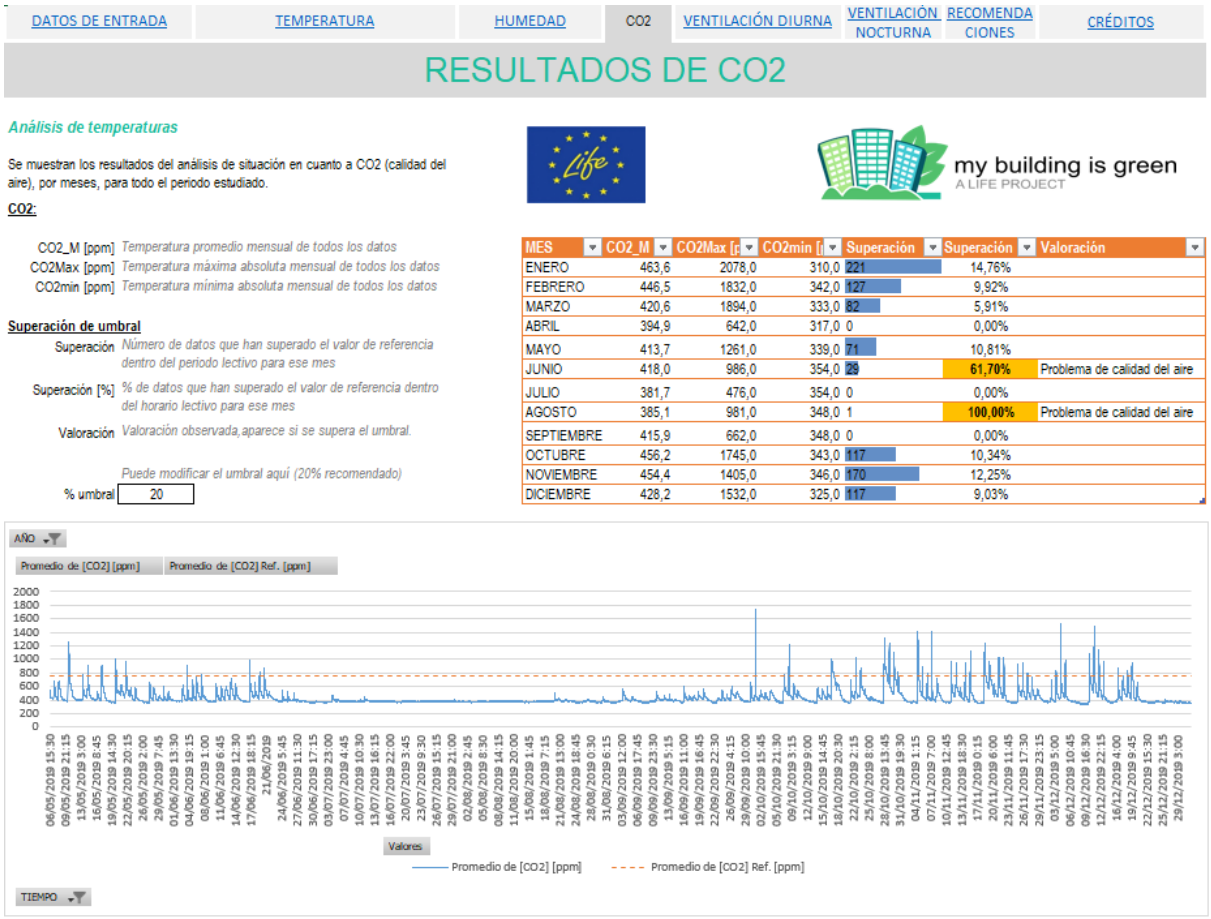


Figura 20. Imagen de la hoja en la herramienta en la que se muestra el perfil de concentraciones de CO_2 registrados.

- **TEMPERATURA**. Evaluar con los perfiles de temperatura si durante más del 10% de tiempo escolar de los meses de mayo, junio y septiembre, los valores registrados superan el máximo referido o no llegan al mínimo mencionado anteriormente (las temperaturas bajas no son materia de este Proyecto). Si las temperaturas superan los valores establecidos, se deberían seguir las recomendaciones del procedimiento de actuación orientadas a reducir la temperatura en el interior del aula empleando para ello el aire exterior y en la medida de lo posible aplicar Soluciones Basadas en la Naturaleza como el sombreamiento de los huecos o de las zonas circundantes al edificio, las cubiertas verdes o la instalación de muros verdes interiores.
  El rango de temperaturas considerado como válido sería desde 14 a 25ºC. La máxima temperatura indicada por razones de salud serían 27ºC. El valor de temperatura máxima puede ser modificado en la hoja inicial.

- **HUMEDAD RELATIVA**. En primer lugar, calcular el valor promedio de las mediciones recogidas durante el periodo lectivo y comprobar si está dentro del rango mencionado[18]. Si este valor está fuera, evaluar con los perfiles de humedad si durante más del 20% del tiempo los valores registrados se encuentran fueran del rango

[18] Humedad relativa entre 30-60%.

establecido. Si es así, se deberían seguir las recomendaciones del procedimiento de actuación orientadas a elevar o disminuir los niveles de humedad según el caso.
El rango de humedad considerado como válido está entre el 30-60 %. Ambos valores podrían ser modificados en la hoja inicial si el usuario considera que las características de su caso así lo aconsejan.

- **CONCENTRACIÓN DE CO_2**. Evaluar con los perfiles de concentración de dióxido de carbono si durante más del 5% del tiempo se superan los valores máximos establecidos. Por otro lado, también es interesante determinar el tiempo que se tarda en alcanzar estos valores máximos con todas las personas en el aula y con los huecos completamente cerrados. Este es un ensayo que se tiene que realizar en el propio aula con todas las personas habituales presentes. La principal solución a aplicar es la ventilación natural mediante la apertura de huecos siguiendo las recomendaciones descritas en el procedimiento de actuación.
  Los niveles de concentración de CO_2 no deben superar los 750 ppm. Este valor puede ser modificado en la hoja inicial por si se quiere adaptar al caso de estudio. Antes de la pandemia de COVID-19, el valor de referencia que se empleaba eran 1000ppm y estaba orientado a que no afectara a la capacidad de concentración de los alumnos. En la situación actual, lo que se busca es reducir el riesgo de contagio si hubiese alguna persona infectada en la sala.

Procedimiento de actuación:

Cuando los niveles de **<u>temperatura</u>** superen los recomendados, el procedimiento a seguir es:

- Durante los meses de más calor en los que las temperaturas interiores que se alcancen sean superiores a 26-27ºC, es recomendable aprovechar la noche para ventilar el colegio y las aulas y así refrescarlo. El objetivo es reducir la temperatura interior (bajando la carga térmica del edificio) durante la noche y empezar el horario lectivo con la menor temperatura posible (en la época más calurosa del curso, normalmente segunda quincena de mayo, junio y septiembre). La menor temperatura que se obtenga en el interior estará en principio dentro del rango de confort.
- Una vez que la temperatura del aula alcanza los 25-26 ºC (depende de los usuarios), se buscará promover una velocidad de viento de entre 1 y 2 m/s disminuye la sensación térmica de 1 a 2 ºC. Si la temperatura exterior no permite realizar un movimiento del aire por ventilación cruzada, se pueden emplear elementos mecánicos para mover el aire como ventiladores de techo o de suelo.
- Sombrear huecos desde el exterior con soluciones naturales de hoja caduca que permitan bloquear la radiación solar en las épocas de más calor y en épocas frías seguir aprovechando la radiación solar. Diseñar la solución de forma que parte de la fracción visible pueda entrar para mantener unos niveles de iluminación adecuados. Es muy importante que el bloqueo de la radiación se realice desde fuera, de otra forma se estará calentando el aula. Además, es aconsejable emplear soluciones naturales que puedan modular su temperatura mediante evapotranspiración para no aumentar ni el nivel de radiación reflejada ni la temperatura exterior.
- En zonas con más del 20% del periodo lectivo (o inferior si se considera que se están generando perjuicios graves) por encima de la temperatura máxima recomendada, 27ºC, es necesaria la implementación de alguna de las siguientes medidas:
  - Sistemas de sombreado estacional de huecos. Ver soluciones verticales mBiG.

- Instalar sistemas automatizados de apertura de huecos e impulsión de aire para forzar el paso del aire a través del edificio durante el periodo nocturno.
- Instalar muros verdes interiores en zonas de entrada o circulación de aire para favorecer su enfriamiento evaporativo a través del control del riego de la vegetación.
- Evaluar la viabilidad de implantación de una cubierta verde para reducir la insolación de la cubierta del edificio. Aulas en pisos superiores bajo la cubierta.
- Instalar sistemas de ventilación mecánica en las aulas para generar movimiento del aire.
- Auditar las fuentes de calor internas y realizar un plan de apagado de equipos, si es preciso con sistemas de apagado programado. Además de reducir el aporte de calor de ciertos equipos (ordenadores, cañones, fotocopiadoras, etc.), se estará ahorrando energía.

Cuando los niveles de **humedad** no se encuentren en el rango adecuado, el procedimiento a seguir es:

- Si el valor promedio es inferior al valor mínimo del rango (40%) se recomienda instalar vegetación en el interior del aula. Estudiar las soluciones de vegetación interior que propone LIFE myBUILDINGisGREEN en la documentación publicada del Proyecto. En este documento no se han introducido de forma deliberada por no aumentar la extensión del mismo.
- Si los valores de humedad promedio son superiores al límite máximo del rango (60%) primero habrá que determinar la causa del mismo:
    - Alta ocupación de la estancia y baja ventilación. La respiración y la transpiración de las personas genera humedad ambiental. En este caso es necesario aumentar los niveles de ventilación siguiendo las indicaciones que se recogen en el punto posterior relativo a los niveles de CO_2.
    - Problemas constructivos (fallos en la impermeabilización y/o el aislamiento) o fugas que generen humedades en el aula.
    - El régimen de lluvias en la zona es muy alto. Esto puede provocar valores de humedad ambiental por encima del límite recomendado cuando se tienen niveles de ventilación altos. Este caso no se ha considerado como objeto de estudio dentro del Proyecto.

Cuando los **niveles de CO_2** superen los niveles adecuados, el procedimiento a seguir es:

- De forma general, se recomienda mantener los huecos abiertos cuando la temperatura exterior se encuentre dentro del rango recomendado. Por supuesto, esta recomendación no es aplicable en casos de un exceso de ruido o contaminantes en el exterior. Durante la época de más calor, la apertura de huecos durante el periodo nocturno permite bajar la carga térmica de las aulas y poder mantener más tiempo el confort térmico y comenzar el día con una buena calidad del aire. En caso de lugares cercanos a fuentes importantes de tráfico mantener los huecos abiertos solamente durante las horas nocturna con menor circulación de tráfico para evitar la entrada de contaminantes del aire procedentes del tráfico.
- Desde un punto de vista práctico, seleccionar dos ventanas o una ventana y la puerta en paredes opuestas y a poder ser no enfrentados por las que hacer circular el aire

barriendo la mayor superficie de la clase posible. Por otro lado, en las épocas en las que las temperaturas exteriores no sean confortables, realizar la ventilación el tiempo mínimo para recuperar los niveles iniciales. Idealmente se debería mantener la clase entre los 600 y los 750ppm de CO_2.

- De forma general, para un aula tipo de unos 50m^2 y una altura de 3 m con 25 alumnos, con una diferencia de temperaturas entre dentro y fuera de 4 ºC y una diferencia de altura entre la zona de entrada de salida y la entrada de aire de 1 m, la superficie de apertura mínima recomendada sería de 0,93 m^2. La superficie recomendada sería menor en casos con menos alumnos, más diferencia de altura entre los puntos de ventilación y más diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior (o entre una fachada y la otra donde se abren los huecos). Con la herramienta se puede calcular la superficie mínima recomendada de forma sencilla en función de los parámetros comentados. Asimismo, si existe viento en la dirección de la fachada en la que estén abiertos los huecos la superficie también se reducirá porque se dispondrá de un mayor flujo de aire.



Figura 21. Imagen de la hoja de la herramienta que permite estimar el área de apertura para ventilación.

- Por otro lado, la herramienta también permite realizar un cálculo sencillo para estimar los tiempos de ventilación de la aulas. De forma general para un aula con las condiciones mencionadas anteriormente, para bajar desde una concentración de 750ppm a una concentración de 450ppm serían necesarios unos 10 minutos, supuesta una mezcla completa con una eficacia del 80%. La herramienta permite realizar una estimación de los tiempos necesarios para conseguir esta renovación del aire.
- Por otro lado, se puede estimar también el tiempo en que se alcanza una concentración de CO_2 de 750ppm partiendo de un aire con 450ppm y 25 personas en su interior. Para el aula del ejemplo anterior, con todos los huecos cerrados, y suponiendo un volumen expelido por minuto de 8 litros por persona y una concentración de 4000ppm, se obtiene que en 58 minutos se alcanzaría la concentración máxima. Por ello, un protocolo que podría ser adecuado es que cada hora que el aula se mantenga cerrada,

se deberían abrir los huecos durante al menos 10 minutos. Todo ello si no se pueden mantener los huecos abiertos todo el tiempo, como es lógico.

- Asimismo, se recomienda buscar las fórmulas para impartir el mayor número de clases en el exterior (no solo las relacionadas con la actividad física) adecuando los espacios disponibles y la programación de las mismas. Se entiende que es una medida que requiere una adaptación, pero desde LIFE myBUILDINGisGREEN se cree una medida muy recomendable.
- La herramienta también permite evaluar si empleando ventilación nocturna se puede acondicionar térmicamente las aulas para mejorar el confort térmico durante el día siguiente. Evalúa el perfil de temperaturas exteriores en la zona para comprobar que se puede bajar la carga térmica del interior del edificio.
- Finalmente, con los análisis anteriores, la herramienta propone una serie de soluciones adaptadas para el caso de estudio de entre el catálogo que está trabajando LIFE myBUILDINGisGREEN.

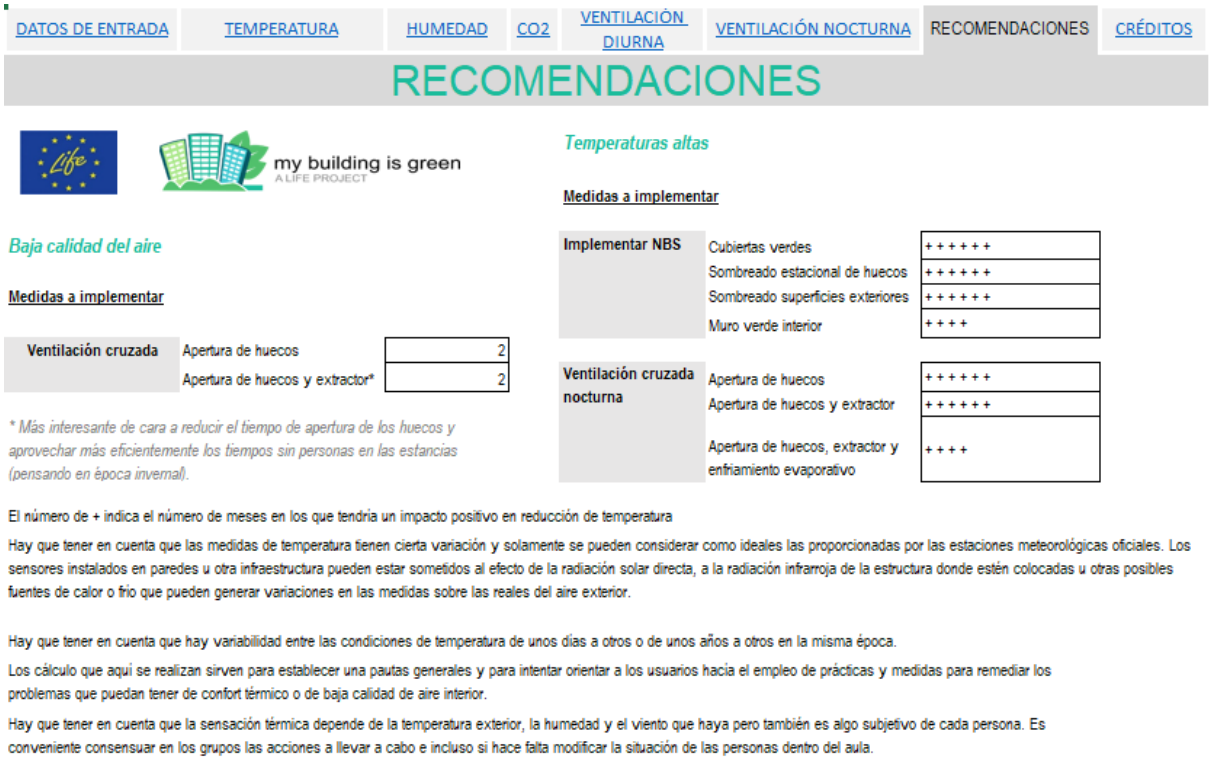


Figura 22. Imagen de la hoja de recomendaciones que realiza la herramienta en base a los análisis realizados.

Como ya se ha comentado anteriormente, actualmente solo se dispone de una versión beta de evaluación que será completada con los ensayos que se realicen durante el Proyecto después de la implantación de las soluciones en los colegios.

10. ANEXOS

A.1 Análisis de datos climáticos.

A.2 Estudio de estrategias bioclimáticas.

A.3 Cálculo solar.

A.4 Cálculo de aberturas.