

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE AULAS PROTOTÍPICAS EN TUCUMÁN

Mercat, Maylis (1) ; Ledesma , Sara Lía (2) ; Gonzalo, Guillermo E (3)
Centro de Estudios Energía, Hábitat y Arquitectura Sustentable. CEEHAS - Instituto de
Acondicionamiento Ambiental. Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional de
Tucumán

Av. Independencia 1800 - 4000 Tucumán – Argentina - Tel.+ .54.381.4364093 int. 7914

maylis.mercat@insa-lyon.fr sledesma@herrera.unt.edu.ar

Recibido 09/08/16, aceptado 07/10/16

RESUMEN: Este artículo presenta los resultados del estudio del comportamiento térmico de escuelas primarias en la provincia de Tucumán, bajo diferentes condiciones de diseño. Con el fin de determinar soluciones constructivas que garanticen adecuadas condiciones térmicas de las aulas, se realizaron una serie de modelizaciones energéticas con la aplicación del programa Energy+. Luego de definir una escuela prototípica y con el objeto de determinar posibles mejoras y comparar sus efectos entre sí, se analizaron las condiciones térmicas interiores de las aulas, considerando diferentes orientaciones, tipos de muros, techos y obstrucciones solares. Se evaluaron en forma comparativa dos localidades con características climáticas diferentes. Los resultados alcanzados permitieron definir las situaciones de diseño y construcción más adecuada para cada una de las localidades analizadas.

Palabras claves: Escuelas, diseño bioclimático, situación de confort, modelización energética.

INTRODUCCION

“El primer papel de una escuela es de transmitir saberes y valores” (Shamsuddin, 2012). Con tal función, el edificio de la escuela como lugar de aprendizaje tiene que estar a la altura del mensaje que desea ser transmitido. En la mayoría de los casos, la escuela es el segundo hogar de los niños, a veces, el primero. Numerosos estudios han mostrado la relación directa que hay entre calidad de la escuela y capacidad de aprendizaje (Evans, 2010). De hecho, está comprobado que una escuela de mala calidad aumenta el riesgo de delincuencia y ausentismo (Maxwell, 2016). Al contrario, buenas condiciones para estudiar tienen un impacto positivo sobre la autoestima de los alumnos y les das ganas de pasar más tiempo en la escuela (Maxwell, 2008).

La buena repartición lumínica (Pellegrino, 2015), el suficiente aporte de luz natural (Cisterna et al, 2015), la orientación de las ventanas (Küller, 1992), la calidad del aire interior (Cartieaux, 2011) y sobre todo una temperatura interior adecuada (Toyinbo, 2016), son factores de primera importancia para hacer del aula un ambiente agradable para aprender.

Si bien la tendencia internacional es de reducir el consumo de energía de las escuelas (Raatikainen, 2015) (Rospi, 2015), la mayoría de las escuelas tucumanas no cuentan con ningún sistema de calefacción ni refrigeración (Ledesma, 2015). En las condiciones actuales, los alumnos sufren del frío y del calor en las escuelas (La Gaceta, 2015). A pesar de todo, nuevas escuelas se construyeron en los últimos años en la provincia (Plan 700 Escuelas), ¿Pero cómo construirlas para que estén adecuadas térmicamente? ¿Qué materiales, qué orientación, qué soluciones constructivas elegir para que las aulas se acerquen a las condiciones de confort, disminuyendo la necesidad de contar con un sistema de acondicionamiento artificial del aire?

ESTUDIO PREVIO

En el presente trabajo, se enmarca dentro de la Pasantía en Investigación de la carrera de Ingeniería en Energía y Medio Ambiente del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas (Lyon, Francia) y se desarrolló dentro del Proyecto de Investigación SCAIT_UNT: “Habitabilidad, energía, ambiente en escuelas en S.M. de Tucumán”, de la FAU UNT.

(1) Maylis Mercat, pasante de investigación del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas (Lyon, Francia)

(2) Sara Lia Ledesma, Profesora Asociada FAU-UNT

(3) Guillermo Gonzalo, Profesor Titular FAU-UNT

El estudio se realizó a partir de la utilización de diferentes Programas, Sketch Up Pro 2016 para modelizar formalmente el prototipo, OpenStudio1.11.0 para definir los parámetros energéticos útiles a la modelización, EnergyPlusV8-5-0, para definir diferentes variables de salida, fundamentalmente temperatura interior del aire y Radiance para el estudio lumínico.

En una primera etapa del trabajo, se compararon los datos de temperatura interior y exterior del aire, en una escuela ubicada en la localidad de Tafí del Valle, obtenidos con registradores de datos HOBO Mod.H08-004, con las temperaturas interiores generadas por Energy+. Esta comparación permitió comprobar que las salidas del programa son similares a los valores reales, por lo que permite tener una idea fiable de la temperatura interior con o sin gente. Se comprobó además, que los materiales del modelo responden de manera similar a la situación real bajo las mismas condiciones de temperatura. Además, se realizaron cálculos de infiltraciones por medio de mediciones de CO₂.

DEFINICION DEL PROTOTIPO DE ANÁLISIS

Los estudios se realizaron para dos localidades de la Provincia de Tucumán, San Miguel de Tucumán (SMT) y Tafí del Valle (TdV). Considerando que si bien en su normativa IRAM establece diferentes zonas climáticas en Argentina y define medidas constructivas propias a cada zona, muchas escuelas se construyen bajo iguales pautas del norte al sur de Argentina, situación que se verifica en Tucumán.

Características climáticas de las localidades analizadas

La localidad de SMT, ubicada en la zona bioambiental IIb, a 650m de altura, presenta elevadas temperaturas en verano, siendo sus valores máximos medios de 30,7°C, registrándose un máximo absoluto de 41,8°C, con una amplitud térmica de 11°C y elevados niveles de humedad, con valores máximos de 82% y mínimos de 63%. La estación de invierno es menos rigurosa, con valores mínimos medios de 7,7 °C, registrándose una mínima absoluta de -2.2 °C, la amplitud térmica es de 12,2°C. Presenta altos niveles de humedad durante la mayor parte del año. (Ledesma et al, 2014)

La localidad de TdV se encuentra ubicada en la zona bioambiental IIa, pero debido a su elevada altura (2400m), presenta temperaturas muy bajas en invierno, siendo los valores medios mínimos de 2,2° y los mínimos absolutos de -9°, registrándose 31 días con heladas en el período invernal (junio, julio, agosto). La amplitud térmica supera los 14° y los niveles de humedad son bajos con valores medio mínimos de 22%.

En verano, el clima es templado, con temperaturas medias máximas de 20,5° y máximas absolutas que alcanzan los 29°, registrándose una amplitud térmica que no supera los 10°. Los niveles de humedad son superiores a los de invierno con valores medios mínimos de 58%. (Ledesma et al, 2015)

Con el objetivo de proponer mejoras en la envolvente de los edificios escolares, de modo tal de lograr que las escuelas a construirse en el futuro, sean energéticamente eficientes, se diseñó un modelo prototípico. El modelo de análisis se estableció considerando una tipología de organización de las aulas que se presenta con cierta frecuencia en Tucumán. El análisis se realizó sobre un aula del modelo, por lo tanto el estudio se circunscribió para dicha aula, considerada rodeada de otros espacios cerrados, tales como un pasillo u otras aulas adyacentes.

Dimensiones

Las dimensiones de las aulas del modelo se establecieron respetando la norma de construcción escolar vigente (Ministerio de Cultura y Educación, 1998), se definió el aula prototipo de 6,7m de ancho, 7,7m de largo y 3,4m de alto, con un volumen total de 175m³. Las superficie de las ventanas se definió de 5 por 1,2m.

Materiales de construcción

La escuela de referencia se analizó considerando el uso de los materiales de construcción más frecuentes en la zona:

- Para el techo, la solución más comúnmente utilizada es la cubierta de chapa, con cielorraso suspendido de yeso, separados por una cámara de aire. Esta solución estará aplicada tanto en TdV como en SMT. Las características del techo se encuentran en la Tabla 1.

	Tipo	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de Absorción Solar	Resistencia térmica (m ² .K/W)
Techo base	Chapa de metal	0,0016	7800	58	450	0,6	
	Cámara de aire						0,18
	Yeso	0,025	800	0,4	1000	0,3	

Tabla 1: Características del techo (IRAM 11601)

- Para los muros, uno de los mampuestos más empleado en San Miguel de Tucumán es el ladrillo macizo. En Tafí del Valle, las construcciones tradicionales están realizadas en adobe. Se analizaron por lo tanto las siguientes soluciones constructivas de los muros, cuyas características se encuentran resumidas en la Tabla 2.

MUROS	Tipo	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de Absorción Solar
San Miguel de Tucumán	Revoque exterior	0,025	1900	1,16	1000	0,3
	Ladrillo macizo	0,18	1800	0,91	920	
	Revoque interior	0,025	1800	0,93	1000	0,3
Tafí del Valle	Revoque exterior	0,025	1900	1,16	1000	0,3
	Adobe	0,4	1200	0,37	800	
	Revoque interior	0,025	1800	0,93	1000	0,3

Tabla 2: Características de los muros de las aulas prototípicas (IRAM 11601)

- Para las puertas y ventanas, las carpinterías se colocan sin consideración de la localización geográfica: ventanas de vidriado simple y puertas de madera para las aulas. El cerramiento del pasillo para SMT se encuentra resuelto con rejas metálicas. (Ver Tabla 3)

	Tipo	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de Absorción Solar	Transmitancia Solar	Coefficiente de reflexión solar
Ventanas	Vidriado Simple	0,003		0,9			0,837	0,075
Puerta Interior	Madera	0,025	608	0,15	1630	0,5		

Tabla 3: Características de la carpintería (IRAM 11601)

Horarios de ocupación

Los horarios de ocupación del aula se establecen según los horarios de clase: de 8:00 a 12:00 h y de 14:00 a 18:00 h en SMT y de 8:00 a 12:00 h y de 14:00 a 16:00 h en TdV.

Las vacaciones escolares corresponderán a las dictadas por el calendario escolar: del 16 de diciembre hasta el 26 de febrero para las vacaciones de verano y del 15 al 30 julio para el receso de invierno.

Cargas internas

El metabolismo de una persona estudiando en posición sentada esta evaluada a 70W por la Sociedad Americana de Calefacción y Refrigeración (ASHRAE)

Las cargas internas debidas a la iluminación estarán aproximadas a 6W/m² lo cual corresponde a cuatro tubos halógenos de 75W. Como medida de simplificación, las luces se considerarán prendidas durante el total de los horarios de clase.

METODOLOGÍA

Elección de la variable de referencia

Para poder comparar las distintas soluciones constructivas, se necesita una herramienta de referencia común. La variable usada usualmente en estudios proponiendo mejoras energéticas de los edificios es el consumo energético en vatios separándolo en dos categorías: el consumo energético en calefacción y en refrigeración.

Pero, dado a que la mayoría de las escuelas tucumanas no cuentan con ningún sistema de acondicionamiento térmico artificial, este dato de consumo energético por año se vuelve teórico y ficticio.

En el caso de las escuelas de Tucumán, no se trata tanto de minimizar el consumo energético sino más bien de mejorar cualitativamente la temperatura interior. Con este fin, el estudio de los Grados Horas, resulta ser más representativo de la realidad. Al igual que el consumo energético, los Grados Horas se dividen en dos categorías: los Grados Horas de calefacción (GHc) y los Grados Horas de refrigeración (GHR) que representan la diferencia entre la temperatura interior T_{int} , y las temperaturas mínima y máxima de confort. Los GHc y GHR se obtienen gracias a las ecuaciones siguientes:

$$GHc = \sum_{año}(T_{min} - T_{int}) \text{ cuando } T_{int} < T_{min} \quad (1)$$

$$GHR = \sum_{año}(T_{int} - T_{max}) \text{ cuando } T_{int} > T_{max} \quad (2)$$

Cuando la temperatura interior fluctúa entre T_{min} y T_{max} , GH vale cero.

Luego, se suman los GHc y GHR de todas las horas de uso del aula al año. Esta información representa de manera más precisa las condiciones interiores vividas por los niños y permite verificar cuán lejos se encuentra el modelo de llegar a las temperaturas de confort sin ningún aporte de calefacción o de enfriamiento artificial.

Al contrario de lo que se puede pensar en primera instancia, no existe relación de proporcionalidad entre los Grados Hora y el consumo en vatios para casos de aulas con características constructivas distintas. Si bien cuando la cantidad de Grados Hora aumenta, el consumo ficticio para llegar a una temperatura de confort tiende a aumentar, la cantidad de energía requerida para aumentar un ambiente de 1 grado puede variar según las características constructivas del mismo ambiente (bien o mal aislado, espesor de las paredes, etc.). Así, los Grados Hora ilustran bien sobre la calidad del edificio para generar naturalmente una temperatura interior agradable, tomando en cuenta las cargas internas.

A esta altura, es muy importante insistir en el hecho que se estudiarán solamente las horas de uso de la escuela, por lo cual los resultados pueden variar de los obtenidos para edificios de vivienda dado a las condiciones de uso propias a las escuelas (uso únicamente diurno, carga interna importante, etc.)

Elección de las temperaturas de referencia

La elección de las temperaturas de referencia es determinante para este estudio. En efecto, la determinación de las temperaturas de confort influye mucho sobre la suma de los GHc y GHR y les da más o menos importancia a la calefacción o al enfriamiento. Como lo ilustra la Figura 1, bajar la temperatura de consigna $T_{mín}$ de 20 a 18°C permite reducir en 40% la cantidad de GHc necesarias para llegar a una temperatura de confort en Tañí

De la misma forma, aumentar la temperatura de consigna de refrigeración de 25 a 27°C permite reducir un 27% la cantidad de GHR acumulados al año en SMT. (Ver Figura 2)

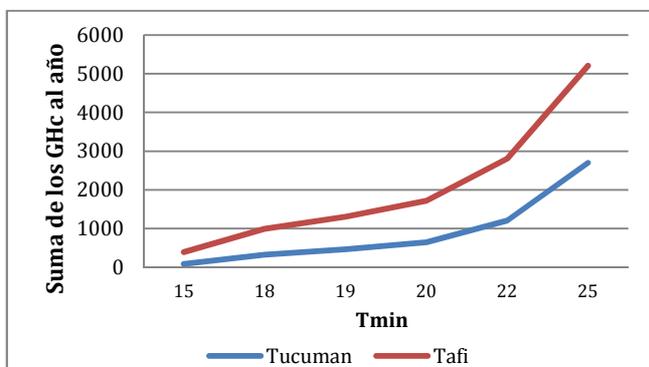


Figura 1: Influencia de T_{min} sobre los GHc

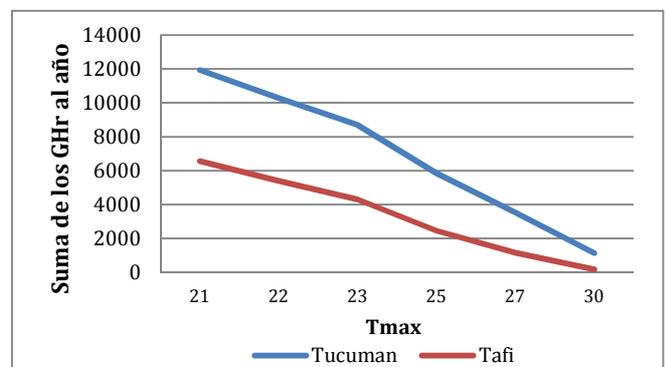


Figura 2: Influencia de T_{max} sobre los GHR

La ley de construcción escolar estipula que la temperatura mínima de las aulas tendrá que estar entre 16 y 18°C. Como medida de precaución, en este estudio elegiremos una $T_{min}=18^{\circ}C$

La temperatura máxima es un poco más difícil de determinar debido a la falta de norma que la establezca. Mientras tanto, varios estudios han sido desarrollados para determinar la relación entre temperatura y capacidad escolar de los niños. Wargocki en un estudio realizado en varias aulas de alumnos entre 10 y 12 años de edad (Wargocki y Wyon, 2013) han mostrado que una temperatura interior elevada (30°C) perjudicaba las capacidades intelectuales de los niños. Según sus resultados, los alumnos serían mucho más eficaces en un aula alrededor de 20°C. Como las escuelas tucumanas no poseen sistemas de acondicionamiento de aire, tomaremos como valor intermedio $T_{max}=24^{\circ}C$.

ESTUDIO DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS

Con la finalidad de poder comparar los distintos parámetros y poder confrontar el impacto de las mejoras entre sí, cada parámetro será probado de manera independiente y comparado con la escuela definida. Así se podrán identificar los parámetros que más tienen efecto sobre el ambiente interno.

Impacto de la localización geográfica

En primera instancia, se analiza la influencia de la localización geográfica sobre los resultados energéticos de la escuela, con el objeto de verificar que las diferentes zonas climáticas analizadas no presentan las mismas necesidades de calefacción y/o refrigeración.

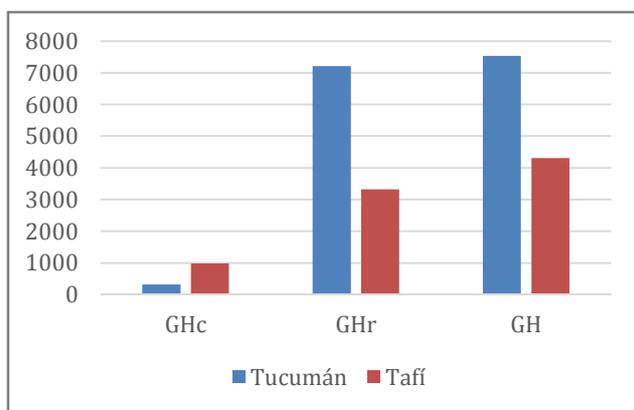


Figura 3: Comparación de las demandas en calefacción y refrigeración según el lugar

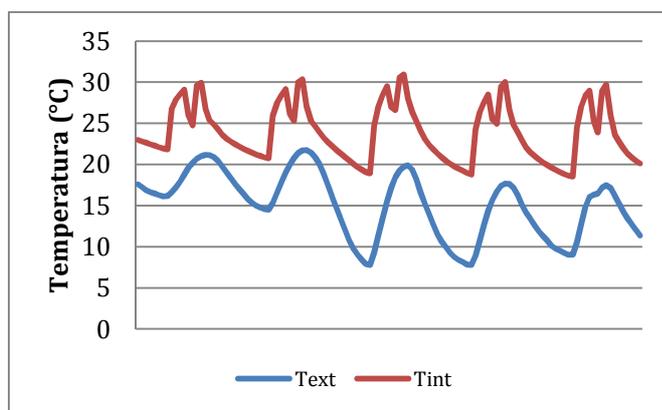


Figura 4: Comparación de las Temperaturas interior y exterior en Taíí durante una semana de verano

La Figura 3, demuestra que las necesidades de las dos ciudades son muy distintas: mientras un aula en TdV presenta una demanda de calefacción 4 veces más importante que la misma aula en SMT, en esta última se necesita el doble en refrigeración. Se demuestra claramente que al tener condiciones climáticas diferentes, las escuelas no tienen ninguna razón de presentar los mismos criterios constructivos.

En SMT, el principal desafío es de poder reducir la temperatura interior de las escuelas durante el verano para poder reducir la suma de los GHR al año. En efecto, la suma de los GHc no es significativa en comparación a los GHR.

En TdV, a pesar de que los GHR parecen tener más importancia que los GHc, durante el verano, la temperatura exterior se mantiene significativamente por debajo de la temperatura interior (ver Figura 4). Entonces, este problema de refrigeración se puede resolver con una simple apertura manual de las ventanas. El principal desafío reside entonces en resolver el problema del frío en invierno bajando la cantidad de GHc.

Impacto de la orientación

La primera solución para obtener una temperatura interior más agradable es de orientar bien el edificio para aprovechar los aportes solares por las ventanas en invierno o al contrario limitarlos durante el verano.

Para el caso de SMT la orientación que más limita el aporte solar en verano es la orientación Sur: permite una reducción de los GHR de 11% en comparación a la orientación más desfavorable que es la Este (Figura 5). A pesar de este resultado que favorece la orientación Sur, otros estudios previos (Ledesma et al, 2015) mostraron que la orientación Norte presenta la ventaja de permitir la ganancia solar en invierno, a la vez de resultar de sencilla protección solar. Se preferirán entonces sistemas para obstruir los rayos directos del sol en verano en vez de cambiar la orientación.

Para el caso de TdV, la mejor orientación para aprovechar el aporte energético solar en invierno es la orientación Norte. Permite disminuir los GHc de 13% en comparación a la orientación Sur. (Figura 6)

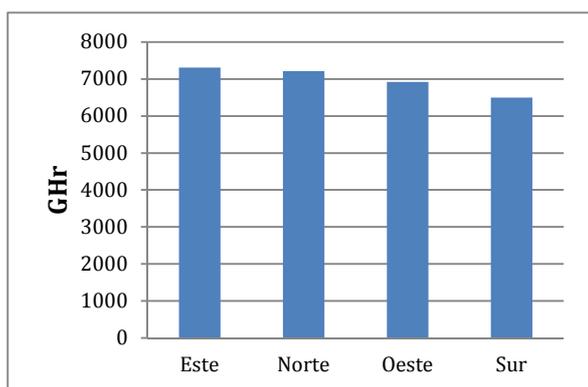


Figura 5: Variación de los GHr en SMT según la orientación

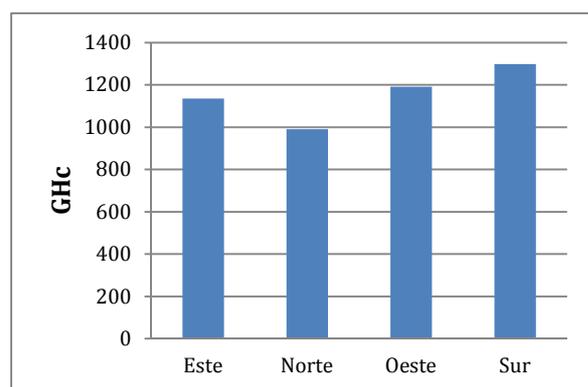


Figura 6: Variación de los GHc en TdV según la orientación

Impacto de los muros

El segundo parámetro a variar es el material usado para los muros. Serán comparados tres materiales comunes: el adobe, los ladrillos macizos y los ladrillos huecos que presentan las características siguientes:

Tipo	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de Absorción Solar
Ladrillo Macizo	0,18	1800	0,91	920	0,7
Adobe	0,4	1200	0,37	800	0,7
Ladrillo Hueco	0,18	1200	0,49	920	0,7

Tabla 4: Características de los muros (IRAM 11601)

Como lo ilustra la Figura 7, para SMT, el mejor material es el ladrillo macizo: permite una reducción de los GHr de 10%.

Para la situación TdV, el mejor material es el Adobe que permite una reducción de los GHc de 19% en comparación al Ladrillo Macizo. (Ver Figura 8)

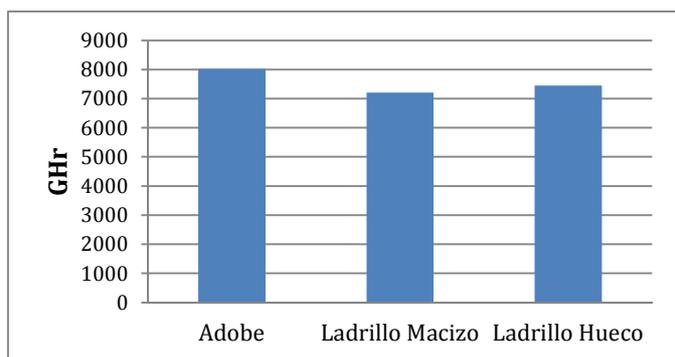


Figura 7: Variación de los GHr en SMT según el material

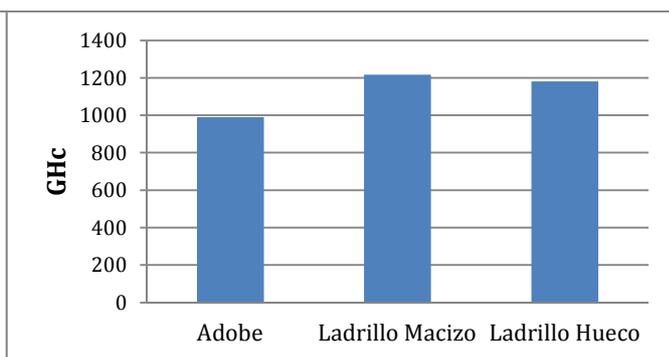


Figura 8: Variación de los GHc en TdV según el material

Se analizó la influencia del color de las superficies externas de los muros sobre los valores de la temperatura interior. La Tabla 5 menciona los distintos coeficientes de absorción solar considerados en el análisis.

	Blanco	Beige	Gris	Negro
Coefficiente de Absorción Solar	0,2	0,3	0,65	0,95

Tabla 5: Coeficientes de Absorción Solar

En SMT, es preferible pintar las escuelas con colores claros, se observa que el blanco permite disminuir un 12% los GHr en comparación con los colores muy oscuros. (Figura 9)

En cambio TdV, es preferible elegir colores oscuros que absorben más la radiación solar en invierno, se observa una mejora del 15% en la temperatura interior. (Figura 10)

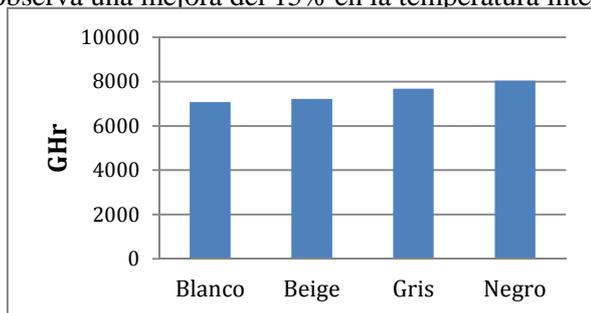


Figura 9: Variación de los GHr en SMT según el color de la pared

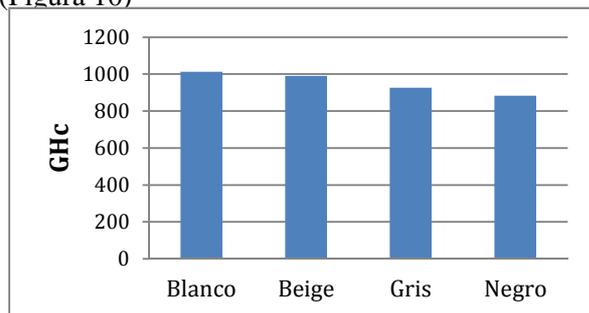


Figura 10: Variación de los GHc en TdV según el color de la pared

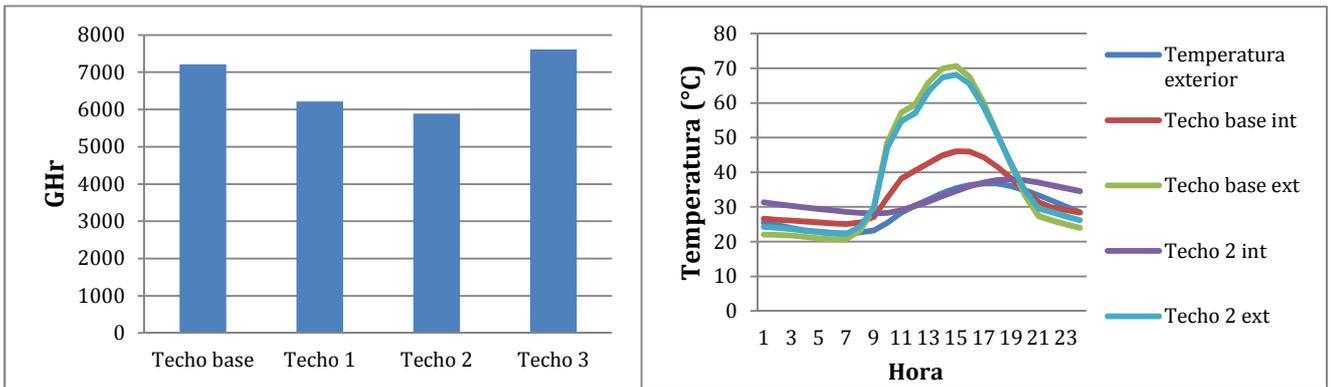
Impacto del techo

Se analizó la incidencia del techo sobre la variación de las necesidades de refrigeración y calefacción del aire. Se evaluaron diferentes soluciones constructivas, de manera tal de destacar la mejor opción para cada caso. Las características de los techos volcadas al programa de cálculo Energy+ se encuentran en la Tabla 6:

	Tipo	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de Absorción Solar	Resistencia (m ² .K/W)
Caso 1 - Techo de losa, con cubierta de baldosa	Baldosa	0,010	1600	0,76	920	0,7	
	Mezcla	0,025	1900	1,16	1000	0,7	
	Contrapiso	0,05	1600	0,76	960	0,7	
	Losa	0,12	2000	1,16	1000	0,7	
	Yeso	0,025	800	0,4	1000	0,3	
Caso 2 - Techo de losa con cámara de aire y cubierta de chapa	Chapa de metal	0,0016	7800	58	450	0,6	
	Cámara de aire						0,18
	Losa	0,12	2000	1,16	1000	0,7	
	Yeso	0,025	800	0,4	1000	0,3	
Caso 3 - Techo Chapa con cámara de aire y cielorraso de tejuela	Chapa de metal	0,0016	7800	58	450	0,6	
	Cámara de aire						0,11
	Tejuela cerámica	0,015	1600	0,76	920	0,7	
	Yeso	0,025	800	0,4	1000	0,3	
Caso 4 - Techo Losa con cielorraso y tierra	Tierra	0,20	2100	1,3	840	0,7	
	Hormigón pobre	0,10	1600	0,76	960	0,7	
	Losa	0,12	2000	1,16	1000	0,7	

Tabla 6: Características de los techos (IRAM 11601)

En SMT, la chapa del Techo base, en pleno verano, puede alcanzar una temperatura de 70°C en su cara exterior y 46°C en su cara interior. Con la losa (Techo 2) la temperatura de la cara interior baja a 34°C como lo muestra la Figura 12. Si se comparan el techo base con el techo 2, se observa que el techo 2 permite bajar el 18% de los GHr. (Figura 11)



En Tañí, como lo muestra la Figura 15, agregar masa térmica sobre el techo de losa (Techo 4) permite

Figura 11: Variación de los GHr en SMT según el tipo de techo (Techo base, Techo 1, Techo 2, Techo 3). El día de invierno: la temperatura interior del techo base (Ver Figura 14).

Figura 12: Variación de la temperatura de las caras interior y exterior de dos techos un día de verano en SMT

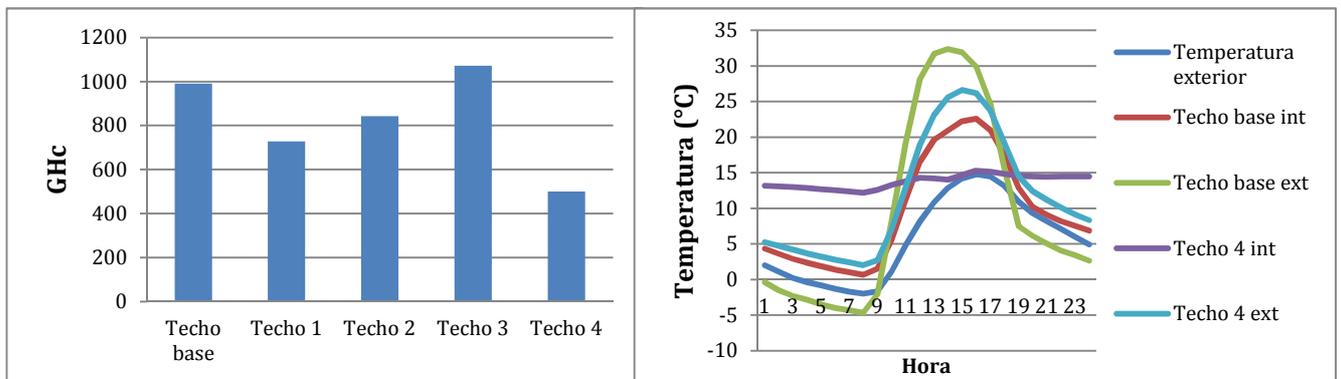


Figura 13: Variación de los GHc en Tañí según el tipo de techo

Figura 14: Variación de la temperatura de las caras interior y exterior de dos techos un día de invierno en Tañí

Del mismo modo que el tipo de techo influye sobre la temperatura interior del aula, la aislación del techo puede tener grandes consecuencias. Para evaluar dicha incidencia se analizó el techo base incorporando entre 25 y 200mm de Poliestireno expandido. (Ver Tabla 7)

Tipo	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m.K)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de Absorción Solar
Poliestireno Expandido	25	0,035	900	0,7

Tabla 7: Característica del aislante (IRAM 1996)

Se observa que para el aula en SMT, colocar 25mm de aislación permite una reducción de los GHr de 10%, un espesor superior no presentaría mejoras significativas. (Figura 15)

En TdV, la variación según el espesor del aislante es notable, los GHc disminuyen de manera más pronunciada con el aumento del espesor del aislante. Poner 25mm de aislante permitiría una disminución de los GHc del 50%, con 50mm una disminución del 58% (Figura 16). A partir de 50mm, la relación costo beneficio es menos interesante. El techo de tierra estudiado previamente se comporta como un techo de chapa con 25mm de aislante: considerando las dificultades que genera la colocación de la tierra y el mantenimiento que requiere, parece más sencillo y menos costoso aislar un techo liviano que instalar un techo pesado.

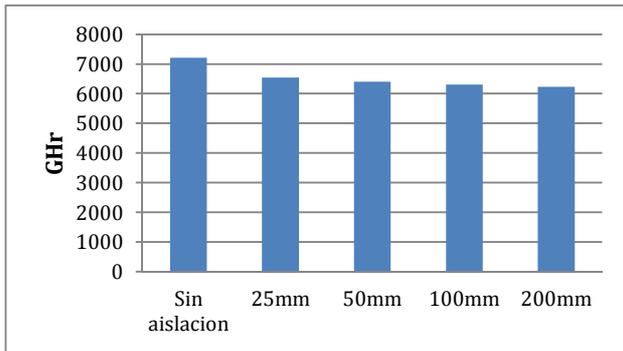


Figura 15: Variación de los GHr en Tucumán según el espesor de

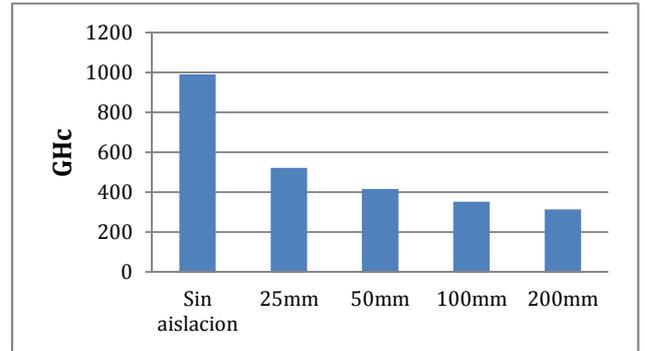


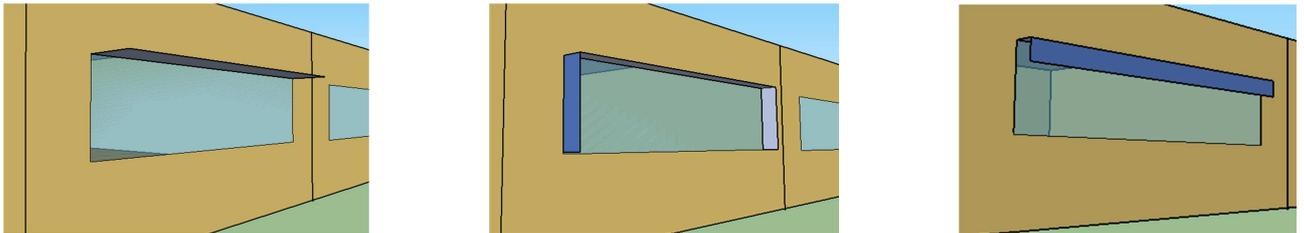
Figura 16: Variación de los GHc en Taftí según el espesor de aislación

Impacto de las ventanas

Las ventanas tienen un gran impacto térmico en las escuelas, además de permitir el ingreso de luz natural en el aula, los mayores aportes y pérdidas de calor se producen a través de estas superficies.

En verano, un aporte térmico excesivo por las ventanas puede perjudicar el confort interior. De hecho, durante algunos días muy soleados, el mencionado aporte puede llegar a los 4000W. En este caso, los sistemas de obstrucción de la radiación solar directa son imprescindibles.

Se analizaron, por lo tanto, tres tipos de parasoles para las orientaciones Norte y Sur. El primer parasol (Parasol Horizontal) se consideró un alero horizontal de 60 cm, ubicado sobre el dintel de la ventana (Figura 17), el segundo (Parasol Tipo Casetonado) constituido por un alero horizontal de 30 cm y pantallas laterales de igual dimensión (Figura 18) y el tercero (Parasol Vertical) conformado por una pantalla horizontal quebrada a los 30 cm y con una pantalla frontal de iguales dimensiones (Figura 19)



Figuras 17, 18, 19: Tres tipos de Parasoles

La mayor eficiencia de los parasoles se verifica para SMT en la orientación Norte. En la figura 20 se observa que es posible reducir hasta un 25% los GHr, siendo el Parasol Horizontal la solución más eficiente para dicha orientación. En la orientación Sur, las ventanas estando naturalmente menos expuestas, los parasoles reducen los GHr en un 10 % aproximadamente. (Figura 21)

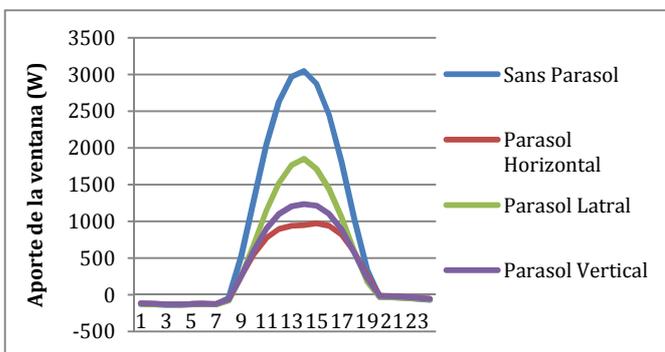


Figura 20: Variación de los GHr en Tucumán según el parasol, Orientación Norte

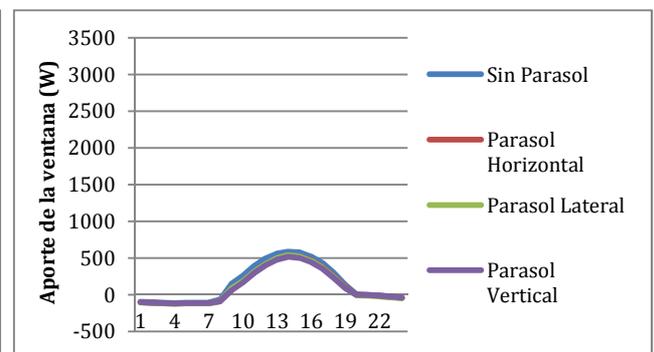


Figura 21: Variación de los GHr en Tucumán según el parasol. Orientación Sur

Además, como lo mostraron otros estudios anteriores (Ledesma et al, 2015), los parasoles tienen un gran aporte en la distribución de la luz natural en el aula, dado que al impedir el ingreso de la radiación solar directa, evitan el deslumbramiento y aportan a la uniformidad del local. Esto se visualiza en los siguientes mapas de iluminación del aula al medio día con y sin parasol, los que se

construyeron con la aplicación del programa Radiance. La norma IRAM (Normas IRAM-AADL 20-09, 1969) recomienda una iluminación homogénea de 500lux. Sin parasol, la iluminación natural alcanza valores hasta 1600 lux, superando en gran medida los valores normados en determinadas zonas. Con parasol horizontal, si bien se disminuye el deslumbramiento, algunas zonas del aula están por debajo de la norma, por lo tanto se concluye que un sistema de ventanas bilaterales será recomendable, de lo contrario se debe recurrir a la iluminación artificial.

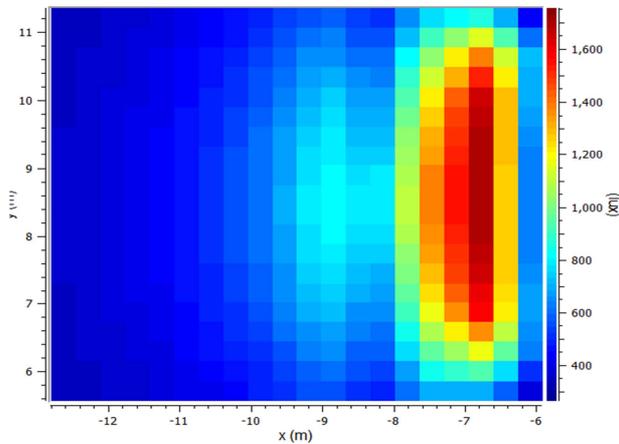


Figura 22, Sin Parasol

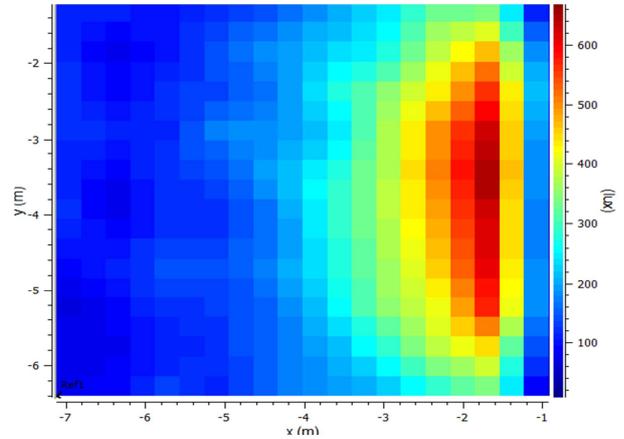


Figura 23, Con Parasol Horizontal

En invierno, de un punto de vista térmico, las ventanas pueden representar una gran entrada de calor por radiación y presentar un balance térmico positivo en el día, pero también puede representar una pérdida de calor por conducción superior a la ganancia por radiación si es que el día está nublado (Ver Figura 24)

Para limitar las pérdidas de calor por conducción, se pueden instalar ventanas doble pared porque no afectan las ganancias por radiación. En TdV, el doble vidriado permitiría disminuir los GHR de 5% en el aula prototipo.

Ganancia solar directa de una ventana de $X_m \times X_m$, con orientación Norte, para San Miguel de Tucumán en un día soleado y uno nublado. Más que el impacto del doble vidriado en sí, es la calidad de la carpintería la que tiene un mayor impacto, una carpintería defectuosa permite la infiltración de 20m^3 de aire por hora y metro de junta (Gonzalo, 2011). En el aula, generaría 2 renovaciones de aire por hora. En invierno, la temperatura exterior puede ser muy baja, y la infiltración no controlada se debe evitar.

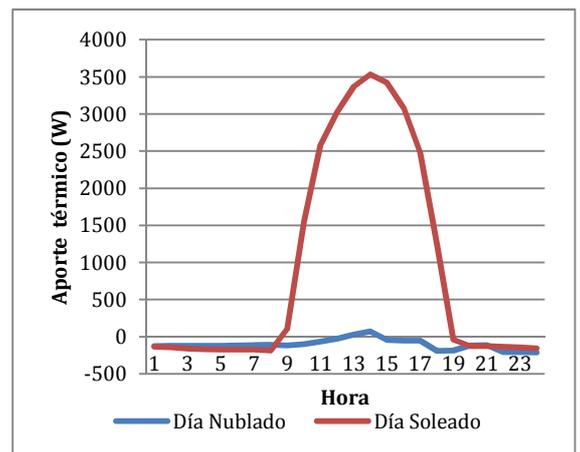


Figura 24: Ganancia solar directa de una ventana de $5\text{m} \times 1,2\text{m}$, con orientación Norte, para TdV en un día soleado y uno nublado

Impacto de la ventilación

Considerando la cantidad importante de cargas internas en un aula: 30 alumnos presentando un metabolismo de 70W totalizan un aporte interno de 2100W a lo cual se agrega la iluminación artificial de unos 300W, estas cargas internas aportadas, determinan una rápida elevación de la temperatura interior.

En invierno, este aporte energético tiene un impacto positivo y permite el auto calentamiento del aula. En cambio, en verano, puede resultar muy complicado eliminar estas cargas internas y la temperatura interior es raramente más baja que la exterior. De esto surge la necesidad de implementar una renovación de aire adecuada.

Como lo muestra la Figura 26, en TdV, una tasa de renovación de aire demasiado alta multiplica los GHc, es conveniente limitar las infiltraciones por las puertas, ventanas, techo, etc. y dejar la posibilidad de abrir las ventanas cuando la temperatura exterior sea más agradable que la temperatura interior. Pero una renovación del aire demasiado baja no permite una evacuación suficiente de las partículas contaminantes, entre otras el CO_2 producido por la respiración. Para evitar este problema, la

Norma de Construcción Escolar recomienda una renovación de aire mínima de $11\text{m}^3/\text{hora}/\text{alumno}$, $330\text{m}^3/\text{h}$ en total, lo cual representa una renovación de 2 veces el volumen total por hora. Para disminuir los GHc que entrega una renovación de aire que da hacia el exterior, puede ser recomendable ventilar hacia otro espacio cerrado, como un pasillo o patio cerrado por ejemplo.

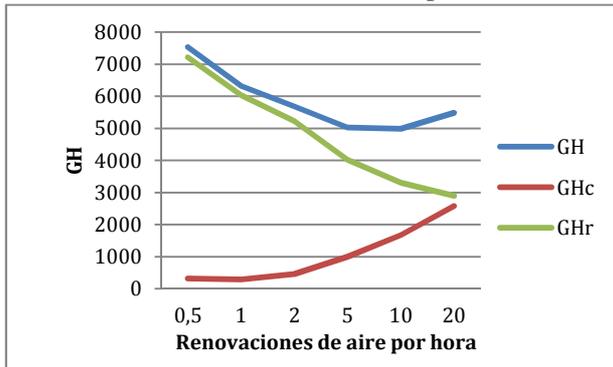


Figura 25: Variación de los GH en Tucumán según la renovación de aire por hora

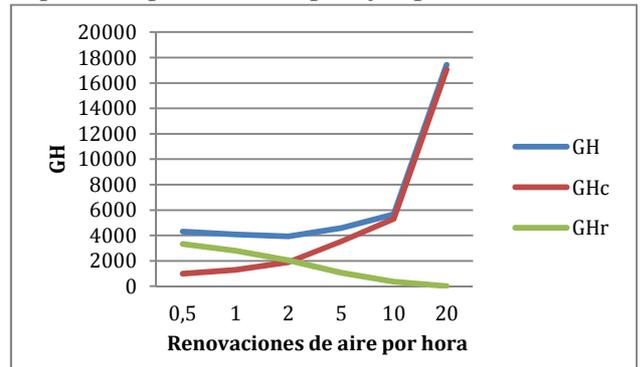


Figura 26: Variación de los GH en Tafí según la renovación de aire por hora

Como se puede ver en la Figura 25, en Tucumán, mantener una tasa de renovación de aire alta todo el año es menos problemático: el aumento de los GHc sigue bajo en comparación la disminución importante de los GHr.

CONCLUSIONES

Las precedentes modelizaciones permitieron destacar las mejores soluciones para mejorar las condiciones interiores de las aulas sin ningún aporte de calefacción ni refrigeración. La cantidad de Grados Hora permiten comparar entre ellas las soluciones y clasificarlas según su importancia.

De este modo, en SMT, por orden de prioridad, las soluciones que más afectan las condiciones internas son, la ventilación, la obstrucción de la radiación solar en las ventanas, el tipo de techo, la aislación del techo, el color de los muros. Pero como un aula es un sistema térmico complejo, hace falta saber si estas mismas soluciones pueden combinarse entre ellas. Como conclusión, se modelizó un aula con 5 renovaciones de aire por hora, con techo de losa, aislado con 25mm de aislante, orientada al norte, con parasoles horizontales, con los muros de ladrillo macizo de color blanco y se le agregó además una ventilación nocturna en verano. Se lo comparó con la temperatura interior del aula prototipo y con la temperatura exterior durante una semana de verano. Como lo muestra la Figura 28, tal solución permite mejorar bastante las condiciones internas del aula, a las 8h de la mañana, el aula mejorada tiene una temperatura de $2,3^{\circ}\text{C}$ más baja que el aula prototipo. Además, el máximo de temperatura del aula no sube a 34°C sino a 29°C .

En total, el aula mejorada permite bajar la cantidad de GHr de 57% al año. A pesar de todo, se puede notar en la Figura 27 que muchas veces, la temperatura exterior sigue siendo más agradable que la temperatura interior. Se destaca una vez más la importancia de la ventilación y plantea un nuevo reto que sería encontrar una solución para aumentar la ventilación y encontrar una forma de enfriar naturalmente el aire insuflado para garantizar una temperatura interior más baja que el exterior en verano. Paralelamente, aumentar el volumen del aula por alumnos permitiría repartir mejor las cargas internas y evitar el confinamiento del aire interior.

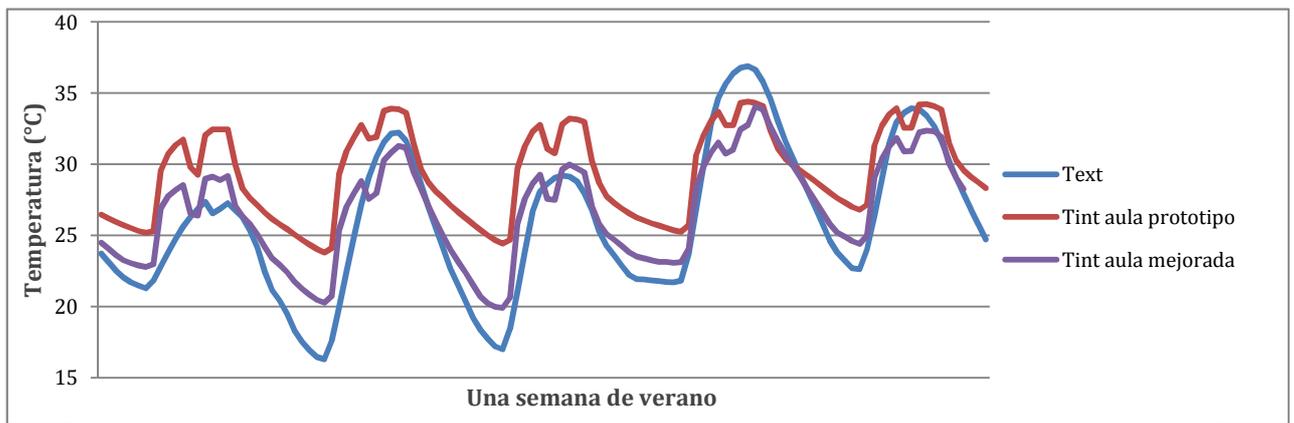
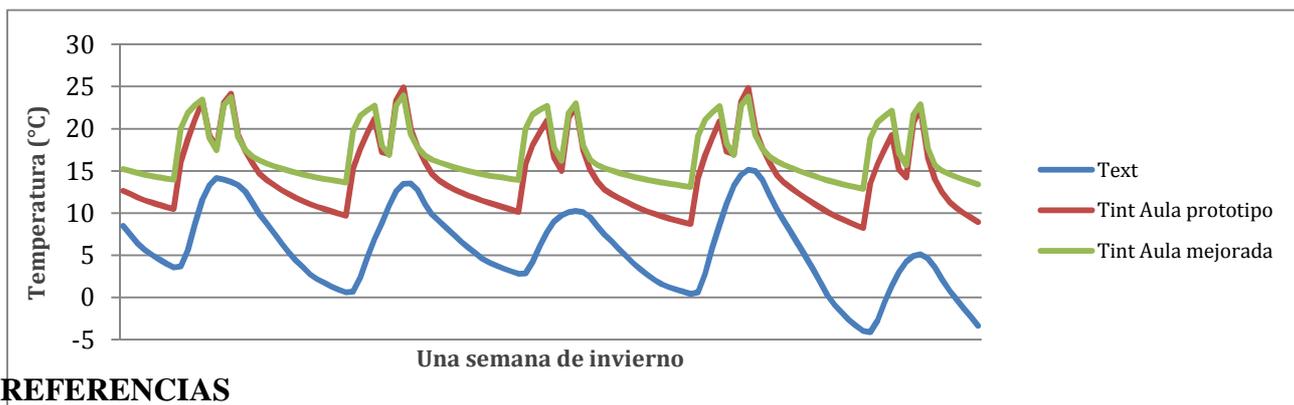


Figura 27: Comparación de las temperaturas interiores y exterior en Tucumán una semana de verano

De la misma forma, en TdV, se modelizó un aula mejorada, orientada al norte, con pocas infiltraciones, con muros de adobe de color gris y un techo de tierra aislado. Como se puede ver en la Figura 29 que representa las temperaturas interiores y exteriores durante una semana de invierno, el aula mejorada tiene una temperatura interior de 12,8°C a las 8h de la mañana en vez de 8,7°C en el aula prototipo. Además, en vez de llegar a la temperatura de confort en 2 o 3 h como el aula prototipo, en menos de una hora, el aula mejorada alcanza una temperatura de más de 18°C. En el año, el aula mejorada tiene un total de GHc 70% menor al aula prototipo. Para seguir mejorando las condiciones interiores, se podría implementar un sistema de persianas de madera para proteger las ventanas a la noche, sin olvidar la importancia de la educación de los usuarios para limitar como máximo las infiltraciones.



REFERENCIAS

- La Gaceta (2011). Calidad de Vida y Bienestar de los Ciudadanos de Tucumán. Tucumán, Tucumán. Vol. 19, No. 7.
- Figura 28: Comparación de las temperaturas interiores y exterior en Tafí en una semana de invierno
- V.M. Nota, G.I. Quiñones, M. de los A. Mostajo, G.E. Gonzalo. Condiciones de habitabilidad y confort en edificios escolares. Iluminación natural en aulas de escuelas de Tafí del Valle, Tucumán. XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 3, pp. 01.25-01.37, 2015. Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Evans G.W. et al. (2010). The ecological context of student achievement: School building quality effects are exacerbated by high levels of student mobility. *Journal of Environmental Psychology*. Vol. 30, Issue 2, June 2010, Pages 239–244. Elsevier.
- Küller R. y Lindsten C. (1992). Health and behavior of children in classrooms with and without windows. *Journal of Environmental Psychology*. Vol. 12, Issue 4, December 1992, Pages 305-317. Elsevier.
- La Gaceta 2015/30/06 “Sin calefacción, los chicos de Tafí del Valle no volverán a clases tras el receso”.
- Ledesma (2015). Ledesma, S.L.; Nota, V.M.; Cisterna, M. S.; Martínez, C.F.; Quiñones, G.I.; Llabra, C.; Márquez Vega, S.G.; Mostajo M.A., Gonzalo, G.E. Habitabilidad en aulas escolares en Tafí del Valle, Tucumán. Propuestas para mejorar su acondicionamiento térmico. XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, pp. 01.13-01.24, 2015.

- Maxwell (2016). School building condition, social climate, student attendance and academic achievement: A mediation model. *Journal of Environmental Psychology*. Vol.46, June 2016, Pages 206–216. Elsevier.
- Maxwell (2008). Environmental personalization and elementary school children's self-esteem. *Journal of Environmental Psychology*. Vol.28, Issue 2, June 2008, Pages 143–153. Elsevier.
- Ministerio de Cultura y Educación (1972) Código Rector de Arquitectura Escolar, Resolución N9 528/MCE/ 72, del 14 de marzo de 1972. Ministerio de Cultura y educación. Argentina.
- Normas IRAM-AADL20-01 a 20-06 (1969), IRAM, Buenos Aires.
- Norma IRAM 11601 (2002), Aislamiento térmico de edificios. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario, IRAM, Buenos Aires.
- Norma IRAM 11603, 1996, Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina, IRAM, Buenos Aires. IRAM 11603.
- Pellegrino (2015) Daylighting for Green Schools: A Resource for Indoor Quality and Energy Efficiency in Educational Environments. *Energy Procedia*. Vol.78, November 2015, Pages 3162-3167. 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015.
- Plan 700 Escuelas: <http://www.700escuelas.gov.ar/> Consultado el 20 de Julio de 2016.
- Raatikainen (2015). Intelligent analysis of energy consumption in school buildings. *Applied Energy*. Vol. 165, 1 March 2016, Pages 416–429. Elsevier.
- Rospi (2015). Analysis of Energy Consumption of Different Typologies of School Buildings in the City of Matera (Southern Italy) *Energy Procedia*. Vol.82, December 2015, Pages 512-518. Elsevier.
- Shuhana Shamsuddin (2012). Relationship between the Outdoor Physical Environment and Students' Social Behaviour in Urban Secondary School. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol.50, 2012, Pages 148-160. AcE-Bs 2012 Bangkok, Sukosol Hotel, Bangkok, Thailand, 16-18 July, 2012.
- Toyinbo (2016). Building characteristics, indoor environmental quality, and mathematics achievement in Finnish elementary schools. *Building and Environment*. Vol.104, August 2016, Pages 114–121. Elsevier.
- Wargocki P. y D. P. Wyon (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, Volume 59, January 2013, Pages 581–589. Elsevier.

ABSTRACT: This paper presents the results of a number of energy simulations realised with the Energy+ software. The aim of the study is to find out constructive solutions to improve the thermal condition in the classrooms of Tucumán, Argentina. After defining a school prototype, different orientations and wall and roofs types were tested, in two towns of the Tucuman region, in order to determine possible improvements and to quantify their effects.

Key words : Schools, Sustainable Architecture, Situation of confort, Energy simulation

Se agradece a la doctora Silvana Flores Larsen del INENCO por su gentil colaboración en el manejo de los softwares.