

EVALUACIÓN DEL CONFORT HIGROTÉRMICO DE UNA ESCUELA RURAL Y SU REDISEÑO, EN SILÍPICA-SANTIAGO DEL ESTERO

Gabriela Giuliano Raimondi

IEADeR -UNSE- CONICET

Beatriz Silvia Garzón

UNT - FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

EVALUATION OF THE HYGROTHERMAL COMFORT OF A RURAL SCHOOL AND ITS REDESIGN, IN SILÍPICA-SANTIAGO DEL ESTERO

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo proponer un rediseño en la envolvente de un edificio escolar rural, situado en Villa Silípica, provincia de Santiago del Estero, con el propósito de mejorar su nivel de confort higrotérmico interior durante el período estival. Fue utilizada una combinación metodológica, descriptiva, experimental y analítica, para el diagnóstico del comportamiento del caso de estudio. Se analizaron los datos obtenidos en la campaña de "Auditoría Higrotérmica", con evaluaciones del tipo subjetiva (de observación y encuestas socio-ambientales in situ) y objetiva, de monitoreo higrotérmico y simulación térmica edilicia, completándola con la verificación del cumplimiento de la serie de normas IRAM sobre Acondicionamiento Térmico de Edificios. Los resultados de la auditoría demostraron que los usuarios sintieron calor en las aulas, las temperaturas interiores medidas y simuladas en el modelo validado excedieron el rango de confort, y los valores de cálculo superaron también los máximos recomendados por las normas de referencia. Se propone, entonces, un rediseño bioambiental de la escuela existente, valorando de forma comparativa la optimización obtenida. Se concluyó que, con los ajustes en la envolvente térmica, puede lograrse un desempeño edilicio eficiente y el nivel recomendado de confort interior en aulas.

PALABRAS CLAVES

Escuela rural, Auditoría Higrotérmica, Mejora del Confort Higrotérmico.

ABSTRACT

The present work aims to propose a redesign of the envelope of a rural school building, located in Villa Silípica, Santiago del Estero province, with the purpose of improving its level of indoor hygrothermal comfort during the summer period. A methodological, descriptive, experimental and analytical combination was used to diagnose the behavior of the study case. The data obtained in the "Hygrothermal Audit" campaign were analyzed, with evaluations of the subjective type (of observation and socio-environmental surveys in situ), and objective, of hygrothermal monitoring and building thermal simulation, completing it with the verification of compliance with the IRAM series of standards on Thermal Conditioning of Buildings. The audit results showed that users felt hot in the classrooms, the measured and simulated indoor temperatures in the validated model exceeded the comfort range, and the calculation values also exceeded the maximums recommended by the reference standards. Therefore, a bioenvironmental redesign of the existing school is proposed, comparing the optimization obtained. It was concluded that, with the adjustments in the thermal envelope, efficient building performance and the recommended level of interior comfort can be achieved in classrooms.

KEYWORDS

Rural school, Hygrothermal Audit, Improvement of Hygrothermal Comfort.

Introducción

Se estima que los niños pasan unas 20.000 horas en las escuelas entre los niveles primario y secundario, por lo que el ahorro de dinero en la construcción de estos edificios no debiera ser una determinante en su diseño; la premisa general de estos proyectos debería tender a mejorar las condiciones de habitabilidad para el desarrollo de la labor educativa, favoreciendo a la creación de un entorno saludable y óptimo para el aprendizaje (Pauli, 2011). Un edificio escolar puede tener una influencia directa en la forma en que asimilamos, aprendemos y nos relacionamos con otras personas; puede afectar además la manera en que como sociedad integramos la sostenibilidad a nuestras vidas: estos edificios tienen el potencial de enseñar y transmitir nuevas formas de materializar principios sostenibles, integrando los aspectos ambientales, económicos y sociales de manera equilibrada. El diseño de una escuela sostenible es la estrategia más apropiada para renovar los procesos educativos y lograr educación con calidad (Gough, 2005). Actualmente, las escuelas públicas son un escenario ideal para la aplicación de principios de "Sustentabilidad y Salubridad" contribuyendo al bienestar de las comunidades, especialmente con los sectores vulnerables (Garzón, 2017).

En Argentina, diversos grupos de investigación recomendaron buenas prácticas de construcción sostenible y principios de bioclimatismo en instituciones escolares. En la provincia de La Pampa, se analizó el comportamiento de escuelas solares, mediante su monitoreo térmico, energético y socio ambiental (Filippín & Flores Larsen, 2019). En San Juan, se realizaron evaluaciones higrotérmicas y energéticas de edificios escolares del Programa Nacional 700 escuelas (Re et al., 2016). En Buenos Aires, se estudiaron posibilidades de adaptación de escuelas rurales a los estándares constructivos, según normativas vigentes, para mejorar la calidad de vida y disminuir el impacto ambiental (Marcilese & Czajkowski, 2011). En la Plata, se analizaron auditorías ambientales y de condiciones de confort en establecimientos escolares (San Juan et al., 2014). Desde el noreste del país, en Chaco y Corrientes, se efectuaron auditorías higrotérmicas y lumínicas, a partir de monitoreos y simulaciones térmicas (Boutet et al., 2013). En el noroeste, se diseñaron escuelas bioclimáticas para aprovechar los recursos naturales disponibles de acuerdo al clima del lugar y, de esta manera, crear espacios confortables desde el punto de vista higrotérmico y lumínico (Belmonte et al., 2016). En Salta, se proyectó el Colegio Albergue "El Alfarcito" (Hernández, 2008), para clima riguroso de montaña, donde se buscó aprovechar la energía solar mediante colectores y sistemas fotovoltaicos. Del mismo modo, con abundante recurso solar, aunque con la diferencia de presentar períodos estivales inclementes, en Santiago del Estero se evaluó la eficiencia térmico-energética de mejoras propuestas a partir del uso de estrategias pasivas y de la incorporación de sistemas solares arquitectónicamente integrados en rediseños de escuelas (Giuliano et al., 2017). Por todo ello, debemos continuar multiplicando esfuerzos en proyectar edificios escolares, con la visión de disminuir las demandas de energía en iluminación, calefacción y refrigeración, con la misión de minimizar las emisiones de CO₂, que impactan negativamente al ambiente (ONU, 2018).

Objetivo

Evaluar el compartimiento de una escuela rural de Santiago del Estero, mediante el análisis de los resultados de una auditoría higrotérmica, proponiendo ajustes en la envolvente térmica y verificando la mejora en el confort interior de aulas.

Metodología

En este trabajo se ha utilizado una combinación metodológica, descriptiva, experimental y analítica. Siguiendo la metodología descriptiva, se caracterizó el contexto geográfico-climático del caso en estudio. A continuación, se logró el relevamiento arquitectónico-tecnológico, observando su implantación en el terreno y la relación con las orientaciones. La etapa experimental estuvo dada por la realización de una auditoría con evaluación subjetiva y objetiva de las condiciones y el comportamiento higrotérmico edilicio. Esta consistió en la realización de encuestas socio ambientales efectuadas a los estudiantes, para luego proceder a monitorear, durante diez días de ocupación normal, las aulas escolares en condiciones ambientales típicas del período de estival. Para ello, se utilizaron termohigrómetros con función data logger marca HOB0, que permitieron medir y almacenar datos las

temperaturas y humedades relativas en dos aulas de la escuela original. Con los resultados anteriores, fue posible validar el modelo computacional generado en el programa SIMEDIF 2.0 (Flores Larsen, 2019), para la simulación de su comportamiento térmico. También se utilizó la metodología analítica para determinar las estrategias y seleccionar las pautas de diseño bioclimático adecuadas, siguiendo las recomendaciones de la Norma 11.603 (IRAM, 2012), según la zona bioambiental en la que se encuentra. A partir del diagnóstico de situación, se propuso su adecuación bioambiental con el rediseño de la envolvente. Posteriormente, se calculó el desempeño térmico de la escuela rural en comparación con su rediseño y valores admisibles normados. Se obtuvieron, los valores de “K”, de ambos cerramientos opacos y no opacos, comparándolos con los admisibles de la *Norma 11.605* de Valores máximos de transmitancia térmica (IRAM, 2002). Así también, las cargas térmicas de refrigeración “ Q_T ” y coeficientes volumétricos de refrigeración “ G_R ” de los prototipos, que fueron corroborados con valores de “ G_R ”, admisibles de *Norma 11.659- Partes 1 y 2*, de Ahorro de energía en refrigeración (IRAM, 2007). Consecutivamente, se cotejaron valores de pérdidas de calor “G” con admisibles para prototipos y calcularon cargas térmicas de calefacción anual “Q”, según *Norma 11.604 de Ahorro de energía en calefacción* (IRAM, 2004). Por último, mediante el modelo realizado con el programa de simulación, se analizó el comportamiento térmico de la propuesta de mejoramiento frente a lo observado en la escuela existente.

Resultados

1. Situación geográfica y climática de escuela rural

La localidad de Villa Silípica se ubica en el departamento Silípica, a 40 km al sur de la Capital de Santiago del Estero. Es una comunidad rural que cuenta con 1300 habitantes (INDEC, 2010). La provincia es una extensa llanura, dominada por un clima del tipo subtropical, con estación seca, con una precipitación anual de 584 mm. Según la norma N° 11.603 (IRAM, 2012), corresponde a la Zona Bioambiental Ia, siendo Muy Cálida y teniendo amplitudes térmicas mayores a 14°C (Figura 1). Las isotermas medias anuales, oscilan alrededor de los 21,5°C con una máxima absoluta en verano de hasta 47°C y una mínima absoluta en invierno de hasta -5°C. En verano, la media ronda en los 27°C, y en invierno la media se sitúa en los 12°C, en ambas estaciones, con una marcada amplitud térmica diaria (Tabla 1).



Figura 1: Mapa Ubicación Escuela Provincia, Departamento, Localidad y Tabla de Zona Bioclimática “Muy Cálida Ia”. Santiago del Estero, Fuente: Norma IRAM 11.603-2012 y Elaboración Propia.

DATOS CLIMÁTICOS DE VILLA SILÍPICA – SANTIAGO DEL ESTERO- Zona Bioambiental Ia- Muy Cálida					
VERANO (DICIEMBRE)			INVIERNO (JULIO)		
T. Min Media	T. Media	Tem Max Med	T. Min. Med.;	T. Media;	T. Max.Med.;
HR Máx.	HR Media	HR Min	HR Máx.	HR Med	HR Min
20,1°C, 74%	26,7 °C, 64%	33,8°C, 51%	5,6°C, 76%	12,4°C, 68%	20,5 °C, 55%

Tabla 1: Parámetros climáticos de la Zona. Temperaturas (°C) y de HR (%), Medias y Mínimas, y de la Localidad de Villa Silípica. Fuente: SMN- Estadísticas Climatológicas 2005-2015 y Elaboración Propia



Figura 2: Fotografías peatonales de la Escuela N° 6. Fuente: Tomadas por el equipo de trabajo.

2. Caracterización social de la comunidad educativa y arquitectónica-edilicia

La escuela pública primaria N° 6 " Padre Pajón", es la única en la zona. Sus coordenadas de localización son: latitud es de 28° 6' S, longitud de 64° 8'O y está a 141 m de altura sobre el nivel del mar (Figura 2). La comunidad educativa se compone de una matrícula de aproximadamente 120 alumnos de nivel primario. Trabajan allí 15 personas: 3 auxiliares-no docentes, 12 docentes: directora, 7 docentes a cargo de aulas y 4 docentes especiales. La actividad escolar de lunes a viernes se realiza en los horarios de 8:00 h a 12:00h. Al mediodía y hasta las 13:00 h, hay un corte de una hora libre donde se realiza el almuerzo. Desde las 13:00 h y hasta las 15:00 h, los alumnos de 6° y 7° grado continúan en el establecimiento, con actividades de talleres, en lo que se llama modalidad de horario extendido. Además, desde las 14:00 h hasta las 18:00 h, en Aula 2 trabajan alumnos de Nivel Secundario (agrupamiento rural). La escuela rural N° 6, es una de las primeras de la provincia. Fue creada en el año 1887, y a la fecha tiene 133 años de antigüedad. El edificio original, conformado por las Aulas 1, 2 y 3, (A1, A2, A3) se implantó en el centro del terreno. En planta, se aprecia un esquema prácticamente lineal, que se desarrolla sobre un eje principal Norte-Sur (N-S). Posteriormente, el volumen principal fue teniendo sucesivas ampliaciones. La escuela rural, actualmente se conforma por seis aulas, dirección, tres Aulas-Taller (AT), sala de informática y locales de servicio como: cocina-comedor, almacén, sanitarios, depósito y un sector exterior de fogón y hornos de barro. El patio cívico, se localiza hacia el sector oeste en relación al acceso principal de la escuela. El acceso conserva la galería perimetral original, rodeando las tres aulas del volumen principal. Las mismas, son los locales con mayor cantidad de horas de uso y se encuentran en desventaja por tener mayor superficie expuesta a las orientaciones Este y Oeste, consideradas "no recomendadas" por tener mayores horas de exposición solar según Norma 11603 (IRAM, 2012), que evalúa las orientaciones térmicas para cada zona bioclimática. El terreno de la escuela cuenta con poca vegetación, con lo cual, no existe protección natural a la radiación solar de paramentos y aberturas. Las carpinterías no poseen protección de celosías de madera, que admite solo dos posibilidades "abierta o cerrada". La ventilación en las aulas del volumen original, a pesar de ser bilateral no se aprovecha como ventilación cruzada, por estar clausurados los vanos de un paramento, con la imposibilidad de realizar un barrido uniforme (Figura3).


Envolvente Escuela Sectores de Ampliación	K _{CAL} (W/m ² ·K) Verano	K _{MAX} (W/m ² ·K) Verano	Verifica N. 11.605 (2002)	Fotografía Sector Ampliación Escuela Rural N°6
Techo Macizo: Losa sin aislación, con forjado aplicado.	1,71	0,72 Nivel C	NO, Verifica nivel Mínimo C	
Muro LCH e=0,20 m	1,78	1,80 Nivel C	SI Verifica nivel Mínimo C	
Puertas Madera y Vidrio Simple	5,80	1,80 Nivel C	NO, Verifica nivel Mínimo C	
Ventanas Madera Vidrio Simple, sin celosías	5,80	1,80 Nivel C	NO, Verifica nivel Mínimo C	

Tabla 2: Escuela Rural, tecnología de envolvente de Volumen Original y Ampliaciones. Cálculo de K. Fuente: Norma IRAM 11.605:2002, Fotografías tomadas por el Autor y Detalles de Elaboración Propia.

4. Evaluación subjetiva: Análisis de resultados de encuesta socio-ambiental

La encuesta socio ambiental confeccionada, tuvo como antecedentes modelos ya examinados (San Juan et al.,1999). El instrumento propio, fue adecuado al caso de análisis particular; con 9 campos de consulta: 1. Localización del aula, 2. Registro de temperatura y humedad del aire, 3. Horario de ocupación y cantidad de personas, 4. Ventilación, 5. Vestimenta, 6. Iluminación Natural, 7. Iluminación Artificial, 8. Equipamiento y 9. Sensaciones (Fig. 4 izq.). En la escuela rural N°6, se encuestó a un grupo de 24 estudiantes (12 de 6° grado y 12 alumnos de 7° grado); ya que ambos grados utilizan el Aula N°1 en diferentes horarios. Los alumnos del Aula N°2, no pudieron realizar la encuesta, ya que eran niños de 1° grado, iniciando su proceso de alfabetización. A continuación, se analizan los resultados de mayor interés, para la evaluación subjetiva realizada, durante el equinoccio de primavera, próximo al inicio del solsticio de verano; considerado el período más riguroso para la zona (Fig. 4).

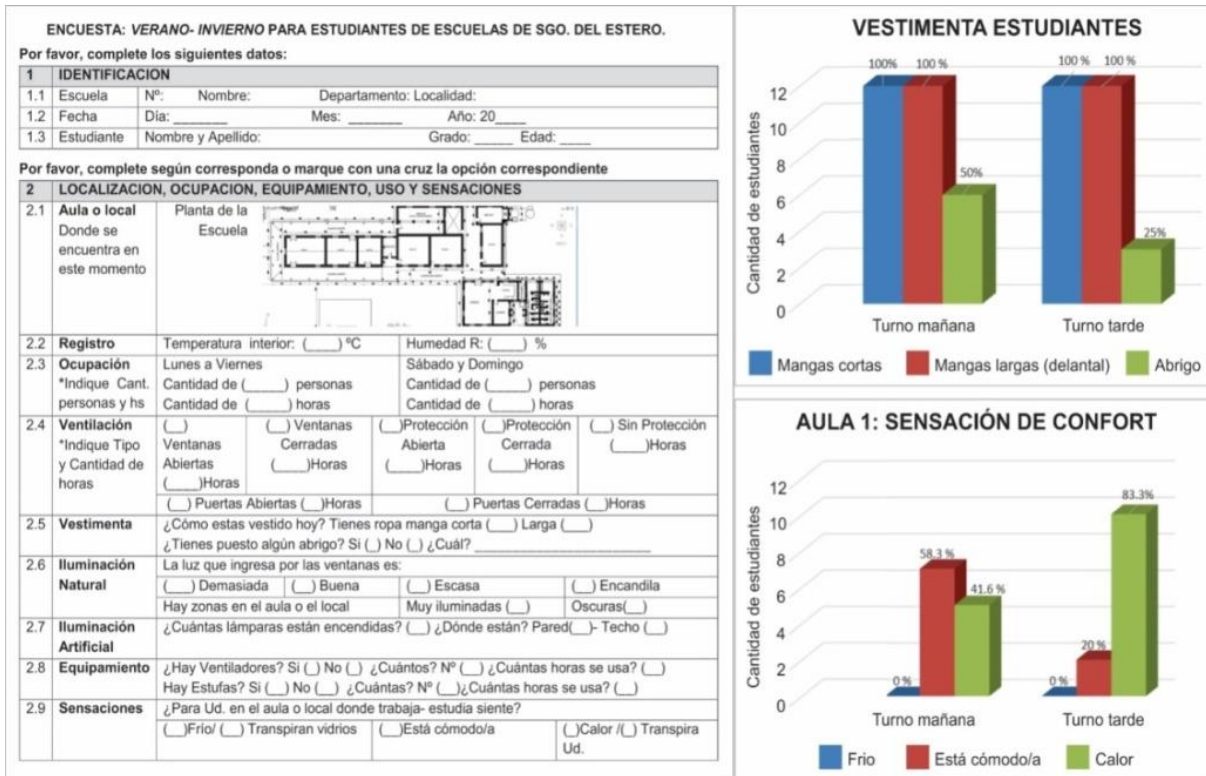


Figura 4: Modelo de encuesta socio ambiental, gráficos de resultado sobre los ítems de vestimenta y de confort- falta de confort. Fuente: Elaboración Propia.

En el ítem N° 5 de vestimenta, resultó que un 100% de los estudiantes de 6° grado, utilizaban 1 prenda mangas largas -delantal blanco- y bajo el cual, además el 100 % respondió, que usaba 1 prenda mangas cortas y solo el 50% de los estudiantes del turno mañana llevaban un abrigo extra, en el momento de ser encuestados 9:00 h. Los estudiantes de 7° grado, que realizan tareas en la misma aula hacia las 14:00 h, respondieron de manera similar, con la diferencia que solo el 25% había traído un abrigo y ya no lo estaba utilizando.

En el ítem N° 9, de sensación de confort (comodidad) o falta de confort (frío o calor): del total de estudiantes del turno mañana de 6° grado, un 58,3% expresó sentirse cómodo, es decir no sentir frío o calor; y el resto del grupo un 41,6% manifestó que sentía calor. En cambio, por la tarde, alumnos de 7° grado manifestaron en su mayoría, un 83,3% sentir calor, es decir que se posicionaron fuera del rango de confort y solo un 16,6 % determinó, que se encontraba cómodo (Fig.4, derecha).

5. Evaluación objetiva: monitoreo higrotérmico y simulación térmica edilicia

El monitoreo higrotérmico se efectuó durante 10 días corridos de normal ocupación escolar. La adquisición de datos se configuró para iniciar el 25 de noviembre y concluir el 4 de diciembre del año 2016 (próximo al inicio del período estival). Las condiciones climáticas se registraron con una estación meteorológica (modelo Vantage VUE, marca Davis), la que se ubicó en un sector de la azotea de la escuela (Tabla 3) . Los sensores interiores que se usaron, fueron del tipo HOBO Data Logger (modelo UX 100-003, marca ONSET), los cuales se instalaron centrados a 2,50 m de altura, en Aulas 1 y 2 del edificio original de la escuela rural (Figura 5). Los mismos, se configuraron también para que la frecuencia del muestreo sea cada 10 minutos, y se protegieron con pantalla de aluminio para evitar el intercambio radiante en el infrarrojo lejano con muros y cielorraso, y con el objetivo de evitar que los sensores se enfríen o calienten por abajo o por arriba de la temperatura del aire.

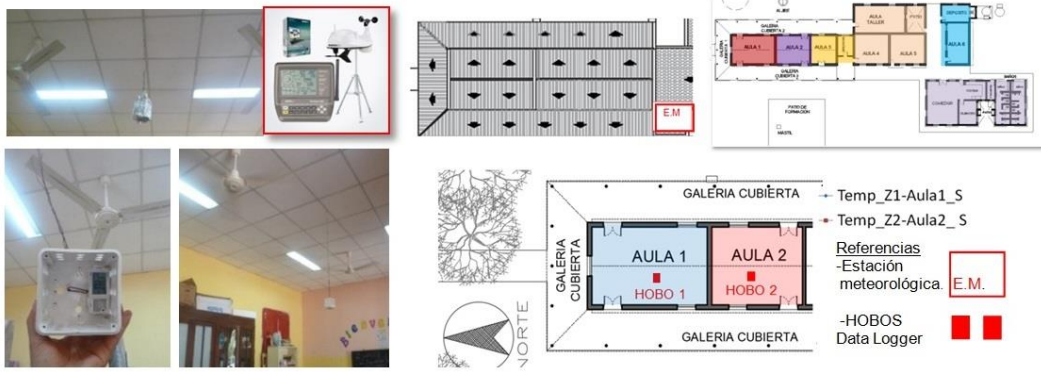


Figura 5: Superior: Planta de ubicación de estación meteorológica en azotea escuela y HOBOS en aulas 1 y 2 y zonas isotérmicas escuela para Simedif 2.0. Fuente: Fotografías y Elaboración Propia

VALORES MEDIOS DIARIOS	25 NO V. 2016	26 NOV. 2016	27 NOV . 2016	28 NOV . 2016	29 NOV . 2016	30 NOV. 2016	01 DIC . 2016	02 DIC. 2016	03 DIC. 2016	04 DIC. 2016	PROM EDIO52 6/11- 04/12//1 6	UNID AD
RADIACION SOLAR	433	487,62	202	108	465	150	494,1	480,25	493,62	487,75	380,14	(W/m ²)
HUMEDAD RELATIVA	43,27	56,91	59,42	74,97	79,12	55,18	59,13	54,24	45,82	59,94	58,80	(%)
VELOCIDAD VIENTO	2,01	3,92	2,45	1,71	1,52	1,7	1,85	2,23	1,6	2,82	2,18	(m/s)
TEMP. EXT. MINIMA	18,3	17,8	20,2	13,6	12	15,5	18	16	19,1	20,2	17,07	(°C)
TEMP. EXT. MEDIA	27,4	24,55	24,8	22	20,95	21,25	26,39	23,65	28,44	27,7	24,71	(°C)
TEMP. EXT. MAXIMA	36,5	31,3	29,4	30,4	29,9	27	34,79	31,3	37,79	35,2	32,36	(°C)

Tabla 3: Valores de condición exterior del período de auditoría higrotérmica. Fuente: Elaboración propia

Los resultados del monitoreo, posteriormente, permitieron validar la simulación del modelo edilicio escolar, efectuada con el Programa Simedif 2.0 (Flores Larsen, 2019), mediante carga de datos geométricos, constructivos y de las condiciones climáticas monitoreadas. A tal fin, se delimitaron para el análisis, seis zonas isotérmicas que se indican diferenciadas por color (Figura6): Zona1=Aula 1 (bordo); Z2=A2 (violeta); Z3=A3 (naranja); Z4=A4 (rosa); Z5=A5 (celeste); y Z6=Núcleo de servicio (lila).



Figura 6: Planta zonas isotérmicas para Simedif 2.0. Fuente: Flores Larsen (2019) y Elaboración Propia.

Respecto a los valores de datos ingresados en el programa de simulación térmica edilicia mencionado, se utilizaron como coeficientes de convección-radiación, $6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ para superficies no asoleadas, $8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ para muros internos asoleados y de $10 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ para los exteriores expuestos a radiación solar directa. Durante los días de clases, los estudiantes mantuvieron las ventanas y puertas semiabiertas, para favorecer la iluminación natural y la ventilación, con lo cual, se cargaron en la simulación computacional la cantidad de cinco renovaciones de aire por hora (5/h).

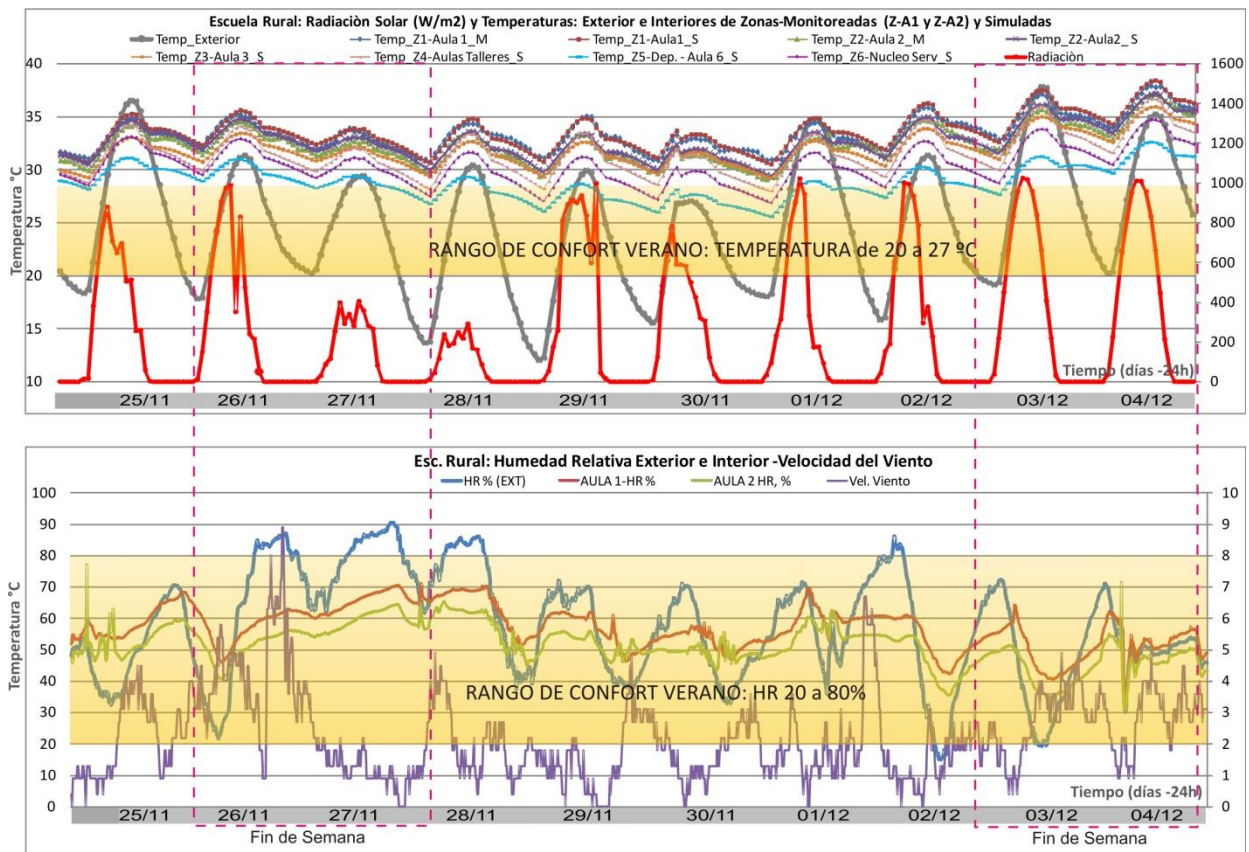


Figura N° 7: Gráfico Superior: temperaturas ext. e int. (°C) de A1 y 2, monitoreadas y simuladas. Gráfico Inferior: Comparación de valores de Velocidad del Viento (m/s), Humedad Relativa (HR%) del Aire exterior y HR% del aire interior en Aulas 1 y 2, medidas y registradas. Fuente: Elaboración Propia.

En la Fig. 7, se presenta dos gráficas con la evolución de temperaturas exteriores e interiores, medidas y registradas in situ en aulas 1 y 2, junto a el resultado de temperaturas de aulas simuladas y en comparación con variables exteriores como radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, en el período considerado de campaña de 10 días, comprendidos entre los meses de noviembre y diciembre. Las temperaturas exteriores fueron rigurosas, presentando importantes amplitudes térmicas (máximas de 37°C y mínimas de 18°C) y las temperaturas medias diarias, se encontraron en el orden de 24- 26°C. Se observa que el día más cálido fue el 3 de diciembre de 2016, ya que se registró 37,8°C de máxima, a las 16:00 hs., mientras que el menos cálido fue el 30 diciembre, con 27°C de máxima. Con respecto a la evolución de las temperaturas interiores, se advierte un ajuste aceptable entre el modelo computacional logrado y el comportamiento térmico medido y registrado, teniendo el primer valor mayores que el segundo, con una diferencia que no superan el 0,5°C. A su vez, comparativamente los valores medios de temperaturas internas, tanto en la simulación como en el monitoreo, de las Aula 1 y 2, fueron semejantes con 33,5°C y 32,5°C respectivamente.

El Aula 1 registró valores superiores de temperatura que el Aula 2, con máximos de 35°C y 34°C y mínimos de 31°C y 28°C cada cual, y ambos locales, presentaron alternancia térmica (ΔT), discreta del orden de los 4°C. Esta diferencia, es probable que se deba a la conjunción de varios factores, como ser que el Aula 1 posee mayor superficie cubierta expuesta a ganancia solar directa y paramentos hacia orientaciones Este, Oeste y Norte (3 fachadas, total 80 m²), mientras que el Aula 2 (37,5% de menor superficie, posee solo dos muros expuestos a las orientaciones Este y Oeste. Además, la primera aula tuvo mayor aporte de ganancias internas, por poseer más artefactos de iluminación y por ser utilizada por un grupo de mayor cantidad de alumnos, y en un turno extendido, respecto a la segunda aula. También se observa, que la evolución de las temperaturas internas en aulas medidas en auditoria higrotérmica, tiene correlación continua con las variables externas, ya que los aumentos de temperaturas se corresponden con las horas de mayor incidencia solar. En el gráfico superior de Figura 7, además se observan las curvas resultantes de la simulación. La tercer aula o zona 3 (Z3), resulto con 30°C, un valor de menor temperatura media, respecto a las dos primeras aulas; tampoco posee ganancia directa al norte y representa un 55% menos de superficie expuesta a ganancia directa, en concordancia con la primera aula. La Zona 4, agrupa 3 aulas y aumenta con lo cual su superficie exterior sin protección de galería y, por lo tanto, temperatura media aumenta a 31°C aproximadamente. Continuando en orden, los locales menos cálidos simulados, fueron la zona es la N°6, de núcleo de servicios con 30,5°C y la zona 5 de Aula 6 con 28°C de temperatura media; ambas con amplias superficies de paramentos con orientación Sur.

Las temperaturas medias internas en aulas durante el período de uso de 8:00hs a 16:00hs, se mantuvieron en alrededor de entre 33 y 34°C durante la semana de clase. El primer fin de Semana (sábado 26 y domingo 27 de noviembre del 2016) se observó que, aunque sin ganancias internas de personas e iluminación, la temperatura media interior en aulas no descendió, esto probablemente se debió a la importante ganancia solar directa de la envolvente (Este-Oeste), donde se registró un valor de radiación solar que alcanzó aproximadamente los 490 W/m² (Tabla N° 1: Día 26/11/2016). Si bien, los días 26 y 27/11/2016, la velocidad del viento fue la más favorable del periodo (de 3 a 4 m/s), debido a que el edificio escolar permaneció cerrado durante estos dos días, las aulas no tuvieron oportunidad de renovación de aire a través de ventilación natural, lo cual podría haber colaborado, a disminuir el registro de temperatura interior importante. Con respecto a los días 3 y 4 de diciembre, que también fueron de fin de semana, según los registros de datos la radiación solar de media, se mantuvo nuevamente en valores altos, de entre 490 a 500 W/m². El día viernes 2/12/ 2016, fue el cierre de actividades del año lectivo con entrega de libretas y certificados. Los días Sábado 3/12 y Domingo 4/12/2016, evidenciaron también valores de temperaturas interiores elevados, como resultado de ganancias internas de personas y el uso de Iluminación artificial, debido a que hubo reuniones en la escuela del tipo "convivencia escolar y comunitaria", organizadas por la directora del establecimiento y el Comisionado de Villa Silfíca. Por lo cual, en el último fin de semana el edificio funcionó como un centro de encuentro social y vecinal; ya que en áreas rurales los establecimientos escolares son centros de referencia, que también cumplen estas importantes funciones.

En la gráfica inferior de la Fig. N° 7, puede advertirse en forma complementaria otros valores exteriores e interiores medidos y registrados durante los días de auditoría. La velocidad del viento fue baja y rondó en una media de 2,18 m/s y la Humedad Relativa Exterior (HRE) fluctuó entre 21 y 90 %. La Humedad Relativa Interior (HRI), para el Aula 1 estuvo comprendida entre el 40 y el 70 %, mientras que para el Aula 2 entre el 35 y el 70% de HRI.

Según Givoni (1969), los parámetros recomendados para el confort higrotérmico interior de verano, son de 20 a 27 °C; y para Olgay (1963), hasta los 28°C; además, estos autores coinciden en determinar como límites apropiados de humedad relativa interior, los valores comprendidos entre el 20 y el 80%. Por lo cual, en la gráfica inferior de la Figura 7, se observó que la humedad relativa interior, se mantuvo entre valores considerados adecuados para el confort de verano; sin embargo, en la gráfica superior se evidenció que los valores de temperatura interior, excedieron el límite considerado dentro del rango de confort mencionado.

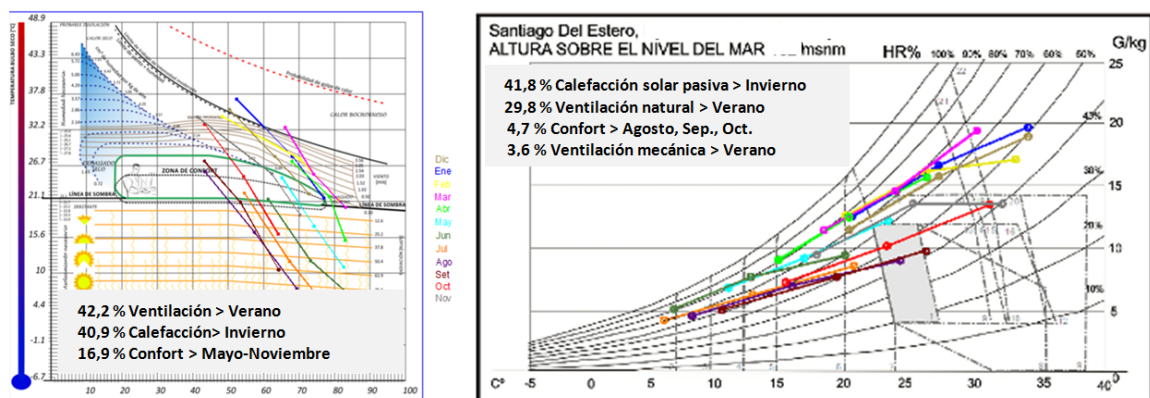
Hasta aquí, el análisis de los resultados aportados por la auditoría, dio cuenta en la etapa de evaluación subjetiva: sobre la sensación de incomodidad por calor, que expresaron sentir alumnos y docentes, a través de las encuestas realizadas. A su vez, en la evaluación objetiva: se obtuvieron valores de temperaturas interiores por monitoreo y del modelado térmico edificio, que sobrepasaron los valores máximos recomendados; con una diferencia que osciló entre 2°C hasta los 10°C, por lo que se presume que, en días subsiguientes, cercanos al inicio del solsticio de verano, la situación se tornaría más crítica. Por todo ello, a continuación, se realiza una propuesta de rediseño bioambiental en el edificio escolar.

6. Propuesta de rediseño bioambiental de la escuela rural

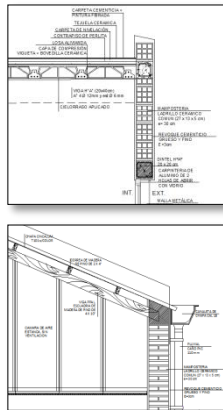
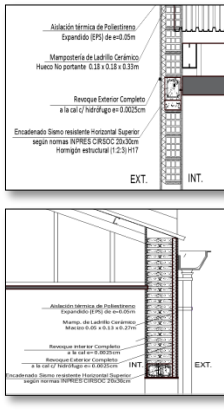
6.1. Determinación de estrategias y selección de pautas bioambientales

En la figura siguiente, puede analizarse la determinación de las estrategias bioclimáticas, mediante el Diagrama de Olgay (1963) y el Psicrométrico de Givoni (1969). A partir de los datos climáticos mensuales de la localidad en análisis: valores de temperatura y humedad relativa (relacionando valores medios máximos, medios mínimos y medios medios), se trazaron segmentos sobre ambos diagramas. De las metodologías empleadas se obtuvieron y consideraron aquellas con mayores porcentajes en relación a su alejamiento de la zona de confort (Garzón, B.; 2006). A la izquierda de la Figura 8, se observa en el diagrama de Olgay que las estrategias de Ventilación y Calefacción, correspondientes a los períodos de verano e invierno respectivamente, tienen porcentajes próximos, de 42,2% y de 40,9 %, mientras que la zona de confort es solo de un 16,9%.

Esto demuestra que la mayor parte del año se encuentra fuera de la zona de confort, siendo necesario adoptar estrategias generales y pautas particulares de diseño que permitan brindar el máximo de confort interno con mínimo costo de energías convencionales. A la derecha de la Figura 8, se encuentra la carta Psicrométrica; de su lectura se obtuvieron los porcentajes de calefacción solar pasiva con 41,8 %, de ventilación natural con 29,8 %, de inercia térmica con 20%, de confort con 4,7 % y de ventilación mecánica con 3,6 %, siendo los más significativos a tener en cuenta los de calefacción solar pasiva y enfriamiento natural, para periodos de invierno y verano respectivamente.



cerramientos superiores, se describió anteriormente los dos existentes: Techo Liviano Tipo 1 y Techo Másico Tipo 1. Al primero se plantea incorporar aislación térmica, de espuma de poliuretano proyectada, bajo cubierta de chapa, con un espesor de 40 mm aproximadamente. Al segundo del tipo, y en mal estado de conservación, se propone añadirle un sobre techo de chapa y aislación de espuma de poliuretano. En la Tabla N°4 siguiente, se presenta de forma comparativa la verificación de cálculos del caso de estudio y de su rediseño bioambiental, junto a los valores admisibles recomendados por la serie de Normas IRAM sobre las condiciones de habitabilidad. La misma, permite observar en sus resultados cómo, mediante la incorporación de masa y aislación térmica, se logra la optimización del comportamiento-térmico-energético de los cerramientos verticales exteriores y horizontales de la rehabilitación. Se utilizó a tal fin, el programa TRAN-Q-E (Garzón & Mendonca, 2013), que permite estimar la transmitancia térmica k y las cargas térmicas y coeficientes volumétricos de calefacción y refrigeración, efectuado según Normas IRAM N°11.601(2004), 11.603 (2012), 11.604 (2004), 11.605 (2002), 11.659-1 (2007) y 11.659-2 (2007).

1.TransmitanciaTérmica "K" (W/m ² K)	ESCUELA RURAL Tipologías 1 y 2 Muro y Techo	REDISEÑO Tipologías 1 y 2 R. Muro y Techo	ESCUELA RURAL Detalle de Envolverte Muro y Techo T 1-2:	REDISEÑO Detalle de Envolverte Muro y Techo T.1-2R:
K_{CAL} (W/m²K) Verano Norma IRAM, 11.900: 2019 Valores de Referencia	Techo 1: 0,82 Muro 1 : 1,68	Techo 1-R: 0,37 Muro 2-R: 0,52		
K_{MAX} (W/m²K) Verano Norma 11.900 (IRAM, 2019) Valores de Referencia	Techo 2: 1,71 Muro 2: 1,78	Techo 2-R: 0,35 Muro 2-R: 0,51		
	Techo 1: NO Muro 1: SI-nivel C	Techo1-R: SI, nivel A/B Muro 1-R: SI, nivel A/B		
	Techo 2: NO Muro 2: SI-nivel C	Techo 2-R: SI, nivel A/B Muro 2-R: SI, Nivel A/B		

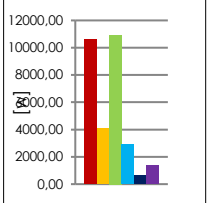
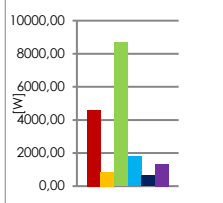
2. Gr y Coef de .T. de Refrig.	ESCUELA RURAL	REDISEÑO	ESCUELA RURAL	REDISEÑO
Norma 11659 (IRAM, 2007)			Carga Térmica	Carga Térmica
Carga térmica de Refrigeración Q_T (W)	30.467,867	17986.13		
Volumen a refrigerar (m^3)	1140	1140		
Coef. Vol. de refrigeración G_R (W/m ³)	26,73	15,78		
Coef. Vol. adm. de Refrig. $G_{R adm}$ (W/m ³)	16,24	16,24		
Verifica N. 11659 (IRAM,2007)	$G_R > G_{R adm}$ NO	$G_R > G_{R adm}$ SI		
3.Pe. de Calor (G) Norma 11604 (IRAM, 2004)	ESCUELA RURAL	REDISEÑO		
$G_{cal}(W/m^3K)=Pe. V. Trans. + cap calorif x renov de aire$	1,835	1,310		
$G_{adm}(W/m^3K)=$	1,319	1,319		
Verifica Norma 11604 (IRAM, 2004)	$G_{cal} > G_{adm}$ NO	$G_{cal} < G_{adm}$ SI		

Tabla 4: Verificación de serie de Normas IRAM sobre Condiciones de habitabilidad edilicia. Fuente: TRAN-Q-E (Garzón et al., 2013) y Elaboración Propia.

El punto 1 de la Tabla N°3 refiere a los valores de transmitancia térmica, K_{CAL} de muro y techo del prototipo estatal y de su rediseño, para condición de verano. El procedimiento de cálculo es de Norma 11.605 (IRAM, 2002), y la comparación con valores $K_{MAX ADM}$ (máximos admisibles), de confort higrotérmico (A, A/B, B y C), fue extraído de tablas E.6 y E.7 de la modificación de norma 11900 (IRAM,2019). El valor de K_{CAL} para el techo liviano tipo 1, K_{cal} fue de 0,82 W/m²K y disminuye de forma considerable a 0,37 W/m²K con su rediseño. En el

caso del muro tipo 1, el valor de K_{cal} es de $1,68 \text{ W/m}^2\text{K}$; mientras que el K_{cal} del muro rediseñado se reduce a $0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$. En ambos casos, la envolvente de la escuela rural mejoró de Nivel C (mínimo), verificando el nivel A/B (intermedio entre "medio y recomendado"), de confort higrotérmico para verano, con respecto a los valores de las normas de referencia.

En el punto 2 de la Tabla fue verificado el coeficiente volumétrico de refrigeración G_{Ry} de carga térmica de refrigeración Q_T en el caso relevado y en el modelo de rehabilitación de manera comparativa. Es necesario hacer la salvedad de que, para dichos cálculos, se tomó exclusivamente el sector de las seis aulas de la escuela, cuyo valor de superficie cubierta es de 380m^2 . El volumen a refrigerar es de 1140 m^3 , con lo cual, los resultados demuestran que se logra ajustar la carga térmica de refrigeración Q_T (W), reduciéndola un 37,60% aproximadamente. Para alcanzar a reducir el Q_T en la propuesta del rediseño, se aplicaron las siguientes mejoras: 1. incorporación del nivel de aislamiento térmico de la envolvente para disminuir ganancias por conducción, 2. ajuste las protecciones solares para disminuir ganancias por asoleamiento y 3. control del sistema de iluminación para reducir ganancias por calor sensible del interior. El resultado del valor de G_R en la rehabilitación fue menor que el G_R admisible estipulado por la norma 11.659 (IRAM, 2007), con lo cual verifica.

Finalmente, puede observarse que el tercer ítem resume los resultados del cálculo de coeficiente volumétrico G de pérdida de calor, de la carga térmica de calefacción y la demanda de energía, siguiendo la Norma 11.604 (IRAM, 2004). En la columna izquierda, el valor obtenido del cálculo en la escuela rural es $G_{cal}: 1,835 \text{ W/m}^3\text{K}$, el cual no verifica con respecto al valor admisible establecido por la norma $G_{adm}: 1,319 \text{ W/m}^3\text{K}$; en cambio en la columna derecha se advierte que el valor en el modelo rediseñado disminuye a $G_{cal}: 1,310 \text{ W/m}^3\text{K}$, logrando situarse por debajo del coeficiente admisible $G_{adm}: 1,319 \text{ W/m}^3\text{K}$.

7. Evaluación del comportamiento térmico de la escuela rural y de su rediseño

Por último, con el programa *Simedif 2.0* (Flores Larsen, 2019), nuevamente se simuló el desempeño térmico interior del rediseño de la escuela rural, con el fin de evaluar su mejora, efectuando la modelización con los datos de temperaturas ambientales recogidos durante la auditoría higrotérmica, entre el 25 de noviembre y el 4 de diciembre del 2016. En el sector superior de la Figura N° 10, se observa a la izquierda las zonas isotérmicas delimitadas en la planta de la escuela rural y a la derecha, el caso de la rehabilitación térmico-energética de la envolvente simplificado a 4 zonas isotérmicas (unificando las 3 primeras aulas por contar con idéntica orientación). Seguidamente, el gráfico central muestra los resultados de la simulación con los ajustes propuestos de aplicación de estrategias bioambientales y la última gráfica, permite comparar estos, con los de la escuela original.

El prototipo rediseñado, se simuló con las mejoras propuestas para las envolventes verticales, horizontales superiores y en carpinterías. Los vanos se consideraron con protección de celosías y Doble Vidriado Hermético (DVH), con valores de transmitancia térmica de 3,3 (día) y $3,3 \text{ W/m}^2\text{C}$ (noche). Los muros exteriores, se cargaron en el programa como muro de ladrillo cerámico macizo común de 0,30m o hueco de 0,20m de espesor con aislación de EPS de 0,05m hacia el exterior. Los techos livianos se simularon como tabiques con mayor aislación y a las losas existentes con la sugerencia de la incorporación de sobretechos, se simularon como paredes con aislación, ya que los Áticos (cámaras de aire) no superan el m^3 de volumen.

La zona 1, que la integra las aulas 1, 2 y 3, presentó las mayores temperaturas con un promedio de 28°C máxima y una amplitud térmica aceptable de $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ (mínima de 26°C). La zona 2 de aulas N°4, N°5 y aula taller y la zona 3 de aula N°6 y depósito, ambas zonas resultaron con apenas, unas décimas de grado de diferencia (máxima promedio de 27°C). La zona 4 de servicio orientada al norte y oeste, presentó una temperatura máxima de $27,5^\circ\text{C}$ y mínima de 26°C , por lo tanto, una la alternancia térmica de solo $1,5^\circ\text{C}$.

En el sector inferior de la Figura N°10, se encuentra la misma gráfica de la escuela rediseñada, a la que se superpuso además la simulación térmica anterior de la escuela rural, con sus 6 zonas térmicas. Se advierte allí claramente, como en el período de 10 días considerado, las aulas existentes en la escuela rural, presentan alternancia térmica importante y con ello, no proveen de buenas condiciones de bienestar térmico a sus usuarios. En contraste, el nuevo modelado termo físico computacional de la escuela rediseñada, se observa que las

amplitudes térmicas fueron discretas en todas sus zonas, manteniéndose los valores de temperaturas dentro de los 20 °C a 27-28°C, considerados por Givoni y Olgay, como apropiados para el confort.

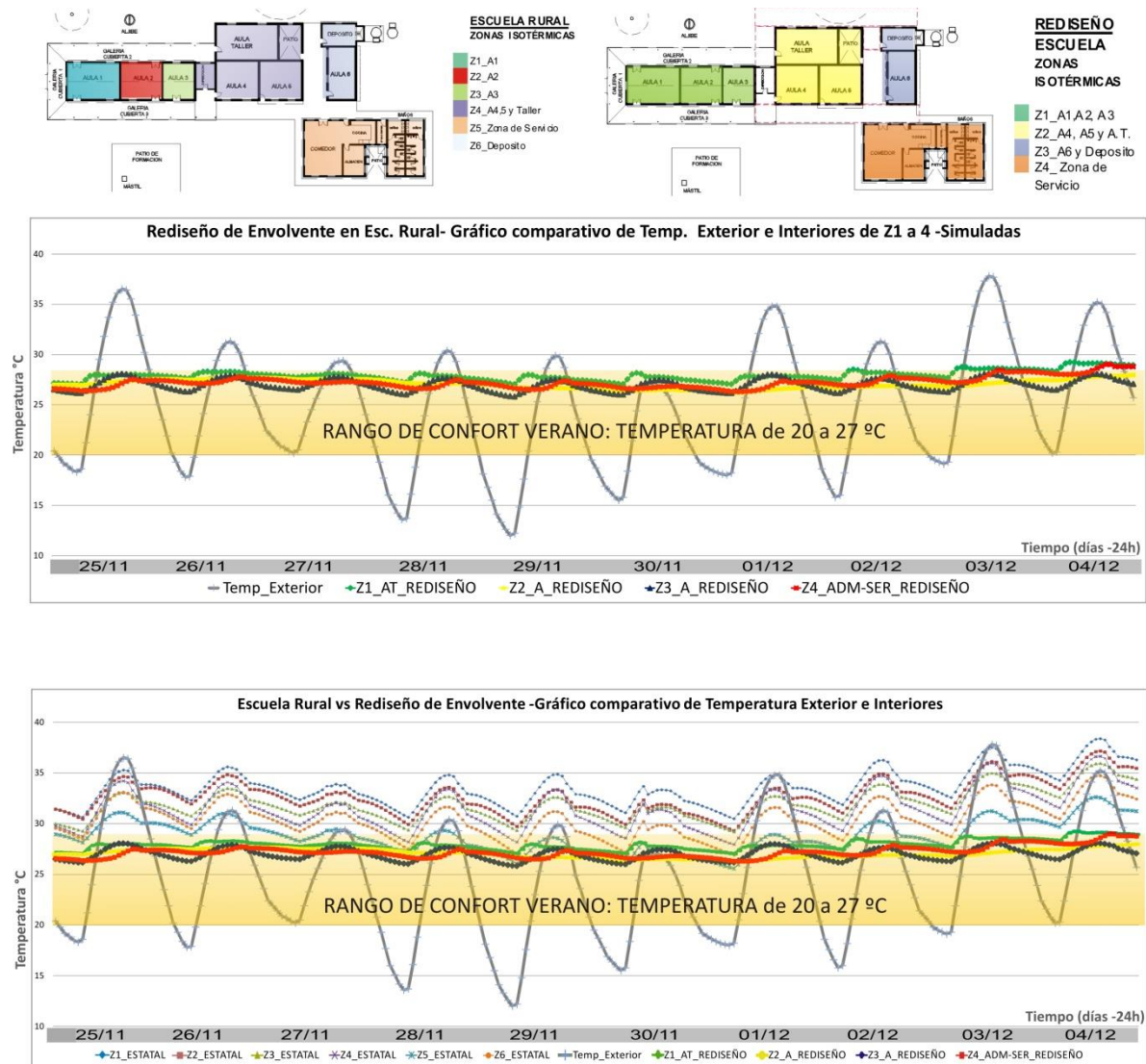


Figura 10: Plantas con zonas isotérmicas de escuela rural y zonas isotermas de propuesta de rediseño, Gráfico de comportamiento térmico interior de aulas en escuela rediseñada y Gráfico superpuesto a escuela original. Fuente: Elaboración Propia.

Conclusión

En este trabajo, se presentó una evaluación de auditoría higrotérmica en una escuela rural pública en la provincia de Santiago del Estero, seleccionada como caso de estudio. La misma se realizó durante diez días de primavera próximos al inicio del período estival, por considerarse éste el más desfavorable en la zona muy cálida. Durante estos días, el establecimiento tuvo una ocupación normal, por parte de su comunidad educativa.

Esta experiencia permitió analizar los datos empíricos, obtenidos en campo como la opinión de los alumnos plasmada en las encuestas y en el monitoreo de temperatura y humedad relativa interior en aulas del edificio escolar y de las condiciones climáticas externas, con instrumental específico, para cada cual. Posteriormente, estos datos relevados fueron contrastados con trabajo de gabinete, examinando los datos teóricos de simulación térmica global edilicia y verificando los cálculos de valores admisibles, según la serie de Normas IRAM dedicada al estudio de las condiciones de habitabilidad.

De la valoración subjetiva y objetiva efectuada, se pudo diagnosticar que en el período cálido el edificio educativo, representa un caso defectuoso de comportamiento higrotérmico. Lo que fue detectado, a través del resultado del monitoreo y de la simulación térmica, con las temperaturas internas obtenidas, que excedieron el rango de confort recomendado; también mediante los cálculos deficientes de transmitancia térmica "k" y de ahorro energético en calefacción y refrigeración. Al mismo tiempo, se corroboró la sensación de incomodidad, expresada por los usuarios. Todo ello evidenció, una conjunción de factores que no colaboran con un buen comportamiento higrotérmico, como: la deficiente implantación en el terreno respecto a las orientaciones y el asoleamiento (tanto del edificio original como de las sucesivas ampliaciones), las características inapropiadas en la resolución tecnológica-constructiva de la envolvente y la falta de parasoles solares adecuadas, a la importante radiación diaria propia de la época.

La totalidad de los recursos analizados fueron herramientas indispensables, para la toma de decisiones en el planteo, que busca ajustar las condiciones térmico-energéticas de la escuela rural. Se propuso rehabilitar las envolventes, mediante un rediseño que permita controlar elementos de sombreado en techos y muros, así como, incorporar aislaciones térmicas en los cerramientos opacos y mejorar la calidad de carpinterías mediante DVH. Con la propuesta superadora diseñada al detalle, se simuló nuevamente y examinó de forma paralela a los parámetros existentes, permitiendo verificar un adelanto a un 75% de comportamiento térmico edilicio óptimo, lo que serviría para disminuir la utilización de sistemas activos para enfriamiento, lo que redundaría en mayor eficiencia energética del edificio escolar.

El aporte del presente trabajo, es visibilizar la necesidad de cumplimiento de las normativas nacionales de infraestructura escolar y de las normas IRAM dedicadas al confort higrotérmico y a la eficiencia energética. Por otra parte, demostrar la ventaja en la incorporación de un conjunto de pautas bioambientales que son viables de ser incluidas por los decisores de la producción de edificios escolares previas a su construcción, para contribuir de esta forma con el propósito de optimizar las condiciones de habitabilidad que favorezcan a procesos de enseñanza-aprendizaje significativos y, por consiguiente, a la calidad de vida de las comunidades escolares de Santiago del Estero.

Bibliografía

- Belmonte, S., Caso, R., Flores Larsen, S., & Balderrama, B. (2016). *Instituto Nacional en Energía No Convencional, INENCO (1980-2015). Capítulo 2: Edificios Bioclimáticos*, p. 37-38. ISBN 978-987-20105-5-3.
- Boutet, M., Hernández, A., & Jacobo, G. (2013). Propuesta de Optimización del Comportamiento Higrotérmico - Lumínico, de un Edificio Escolar de la Región N.E.A., a partir de Monitoreo y Simulación en Período de Otoño. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 17, 1-10.
- Filippín, C., & Flores Larsen, S. (2019). Monitoreo post-ocupación y simulación de un edificio bioclimático no residencial durante la transición primavera-verano en clima de máxima irradiancia. *International Building Performance Simulation (IBPSA)*. Argentina. Latam. Mendoza Argentina 2019. CN° 10_00.
- Flores Larsen, S. (2019). Simedif 2.0. Programa calculador térmico de edificios. *Versión Junio 2019*. INENCO-CONICET.
- Garzón, B. (2017). Hábitat Sustentable y Saludable: Experiencias de Cogestión. *Jornada: Aprender para Enseñar*; UNT-FAU. San Miguel de Tucumán.
- Garzón, B., & Mendonca, C. (2013). *TRANS-Q-E: Programa calculador de transmitancia, cargas térmicas de calefacción y refrigeración y consumos energéticos, según Normas IRAM 11601(2004), 11603 (2012), 11604 (2004), 11605 (2002), 11659-1 (2007), 11659-2 (2007)*. Obra Inscripta en Dirección Nacional de Derechos del Autor DNDA,CABA. Año 2013.
- Giuliano, G., & Garzón, B. (2016). Eficiencia Energética de Escuela Rural en Pellegrini, Santiago del Estero. *ENCACS Acta del I Encuentro Nacional de Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable*, (págs. 17-18). Facultad de Arquitectura, UNLP. ISBN 978-950-34-1345-6.
- Givoni, B. A. (1969). *Man, Climate and Architecture. Elsevier Architectural Science Series. Editor Henry J. Cowan; Professor of Architectural Science; University of Sydney. 444-20039-8. Library of Congress Catalog Card 69-15822*.
- Gough, A. (2005). Sustainable Schools: Renovating Educational Processes. *Applied Environmental Education and Communication*, 4, 339–351.
- Hernández, A., & Quiñonez, J. (2016). Colectores solares calentadores de aire para la calefacción de edificios. Capítulo 3, p. 59-68. Editores Laborde y Williams, Publicado por ANCEFNAF-Academia Nacional de Cs. Exactas Físicas y Biológicas. Publicación N°1.
- INDEC. (2010). *Cuadro P1-P. Provincia de Santiago del Estero. Población total y variación intercensal absoluta y relativa por departamentos y localidades. Años 2001-2010*. Instituto Nacional de Estadística y Censo de la República Argentina.
- IRAM. (2002). *11.601: Acondicionamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- IRAM. (2002). *11.605: Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Clasificación según la transmitancia térmica de la envolvente*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

- IRAM. (2004). *11604: Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- IRAM. (2007). *11659-1: Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: Vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- IRAM. (2007). *11659-2: Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 2: Edificios para viviendas*. . Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM. (2012). *11.603: Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- IRAM. (2017-2019). *11900- 1: Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- Marcilese, M., & Czajkowski, J. (2011). El aula de una escuela rural bonaerense. Su adecuación a la Ley 13059/03 y decreto reglamentario. *ASADES, Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27. pp. 45 - 51, 2011 Impreso en la Argentina. ISSN0328-932X.
- Milne, M., & Liggett, R. (2018). Program Climate Consultant 6.0 (Build 13). Department of Architecture and Urban Design, UCLA.
- Olgay, V. (1963). *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona, España, 1998. ISBN: 84-252-1488-2 : Reeditado en Editorial Gustavo Gili S.A.
- ONU. (2018). *Informe: Objetivos del Desarrollo Sustentable 2030*. Publicación de las Naciones Unidas emitida por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA). ISSN 978-92-1-101390-0.
- Pauli, G. (2011). *La Economía Azul*. Tusquets. ISBN: 9788483833049.
- Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas*. (2020). (Ministerio de Desarrollo Productivo, Argentina) Obtenido de [https:// etiquetadoviviendas.energia.gob.ar](https://etiquetadoviviendas.energia.gob.ar)
- Re, M., Blasco Lucas, I., & Filippín, C. (2016). Evaluación higrotérmica y energética de un edificio escolar perteneciente al programa nacional 700 escuelas, en el área metropolitana de San Juan, Argentina. *Revista Hábitat Sustentable*, vol. 6, 40-51.
- San Juan, G., Hoses, S., Rojas, D., & Moreno, J. (1999). Integración de la opinión de los usuarios en la evaluación ambiental de aulas escolares. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, ISSN 0329-5184, 2: 08.173-0.8.176.
- SMN. (2016). *Estadísticas Climatológicas Santiago del Estero. Período 2005-2015*. Buenos Aires, Argentina.