

MONITOREO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA ESCUELA RURAL EN ALGARROBO DEL AGUILA, LA PAMPA

Flores Larsen S.^{1,2}, Filippín C.^{3,4}, Lesino G.^{1,4}

¹INENCO - Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales – U.N.Sa. - CONICET
 Universidad Nacional de Salta

Avda. Bolivia 5150 – CP 4400 – Salta Capital - Argentina

Tel. 0387-4255424 – Fax 0387-4255489 - E-mail: seflores@unsa.edu.ar

³CONICET – CC302, Santa Rosa, 6300 (La Pampa) Argentina, Tel./Fax: 54-952-434222, Email: cfilippin@cpenet.com.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta el monitoreo y simulación del comportamiento térmico y energético de invierno de una escuela ubicada en el Noroeste de la provincia de La Pampa. Las estrategias pasivas de diseño aplicadas fueron: ganancia directa, control solar, masa térmica y buena aislación en la envolvente, iluminación y ventilación natural. El período estudiado comprende días de invierno en que el edificio se encontró desocupado debido a razones operativas de la escuela y días en los que el edificio estuvo en pleno funcionamiento, con la asistencia de alumnos y el encendido de calefacción. Durante el período no se efectivizó el control solar a través de aleros. La simulación se realizó mediante *SIMEDIF para Windows*. El monitoreo y simulación del edificio permitió evaluar el efecto de las áreas vidriadas, de la orientación de los locales y del encendido de la calefacción. El consumo diario de energía en calefacción fue de 0.009m³/m² construido, que corresponde a un 90% de ahorro respecto a una escuela de diseño y tecnología convencional para la región en estudio.

Palabras Clave: Edificios bioclimáticos, Acondicionamiento pasivo, Climatización natural, Simulación térmica.

INTRODUCCIÓN

Algarrobo del Águila es una comunidad de 250 habitantes ubicada al Noroeste de la provincia de La Pampa, a -36°16' latitud Sur, 66°55' longitud Oeste y 320m sobre el nivel del mar. El clima árido de esta región se caracteriza por bajos niveles de precipitación, elevados niveles de insolación, importantes variaciones estacionales y diarias de la temperatura y elevados albedos. Su vegetación es también típicamente desértica, con predominio del monte bajo y arbustos xerófilos. La región acusa una densidad poblacional de 0.06 a 0.1 habitantes/km², el mayor porcentaje de necesidades básicas insatisfechas y el mayor índice de analfabetismo de la provincia. En dicha localidad se diseñó y construyó una escuela rural para primer ciclo de Educación General Básica. El objetivo fue diseñar un edificio energéticamente eficiente cuyo costo no superara al de una obra convencional.

Tabla 1: Variables climáticas (corresponden a la localidad de Santa Isabel. Latitud: 36°16'; longitud: 66°55' y altura sobre el nivel del mar: 320m). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

Valores anuales	Temperatura media máxima	24.3°C
	Temperatura media mínima	6.7°C
	Temperatura media	15.6°C
	Radiación solar media anual sobre superficie horizontal	18.8MJ/m ²
	Humedad relativa	48%
Temperatura mínima media de julio		-0.6°C
Temperatura media de julio		6.9°C
Temperatura máxima media de julio		15.3°C
Amplitud térmica de invierno		8.4°C
Velocidad media del viento en invierno		7 km/h
Radiación solar media julio sobre superficie horizontal		9.1MJ/m ²
Temperatura máxima media de enero		33.3°C
Temperatura media de enero		24.6°C
Temperatura mínima media de enero		14.3°C
Amplitud térmica de verano		10.3°C
Velocidad media del viento en verano		9 km/h
Radiación solar media enero sobre superficie horizontal		27.4MJ/m ²
Grados-día de calefacción base 18°C		1646

² Becaria Postdoctoral de CONICET.

⁴ Investigadora de CONICET.

La localidad de Algarrobo del Águila carece de datos climáticos, por lo que se emplearon para su prediseño arquitectónico y energético los valores proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional para la población de Santa Isabel, a 80 km de Algarrobo del Águila (ver Tabla 1). A partir del análisis del bioclimograma de Olgyay se adoptaron las siguientes estrategias de diseño: ganancia solar directa, control solar a través de aleros, iluminación natural, masa térmica, buena aislación en la envolvente para minimizar las pérdidas térmicas en el periodo invernal y ventilación natural. El resultado puede verse en las Figs. 1 y 2: la escuela, cuya superficie cubierta es de 357 m², se diseñó como un edificio compacto. Consta de cuatro aulas (Fig. 1), un salón de usos múltiples, una oficina para la directora, un pasillo, baños y un pequeño depósito.

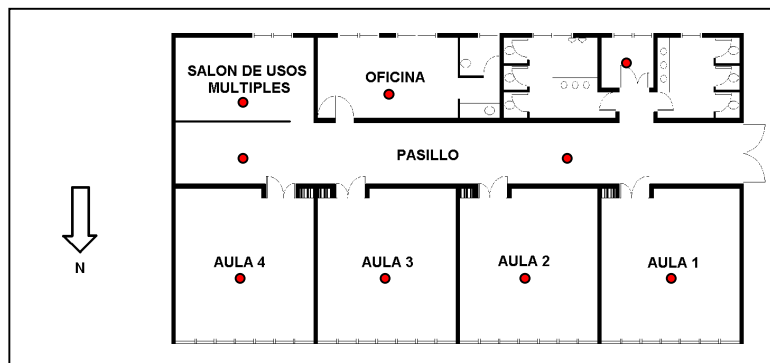


Figura 1. Corte y planta de la Escuela de Educación General Básica en Algarrobo del Águila y ubicación de los sensores de temperatura.



Figura 2. Detalles constructivos de la fachada Norte. Envolvente con aislación (izquierda) y escuela terminada en el año 1995 (derecha).

La disposición hacia el Norte de las aulas permite que todas cuenten con ganancia solar directa e iluminación natural, utilizándose un quiebre de techo para obtener características similares en los locales ubicados hacia el Sur (oficina de administración, salón de usos múltiples y servicios). Las áreas transparentes se resolvieron con carpintería de madera maciza y policarbonato translúcido. Se incluyeron aleros (aún no colocados) de 0.55m de ancho para garantizar el sombreado de las ventanas altas en los meses de verano. En las aulas se incorporaron módulos de carpintería bajo la altura del dintel para proveer visuales al exterior y ventilación natural, como se puede apreciar en la Figura 2.

La masa térmica está conformada por muros de ladrillo macizo de 0.18m en el interior, una capa central de 0.04m de espesor de poliestireno expandido como aislación térmica y una protección de la aislación hacia el exterior de 0.025m de espesor, constituida por un revoque sobre metal desplegado con estructura de madera como soporte. La cubierta es de losa cerámica con barrera de vapor, 0.08m de poliestireno expandido como aislación y chapa galvanizada. Una descripción más detallada del edificio y sus detalles constructivos se puede consultar en los trabajos de Filippín et al. (1993) y Filippín. y De La Mata (1995). En la Fig. 2 se observa el detalle constructivo de la fachada Norte, durante la construcción y ya terminada, en el año 1995.

MONITOREO Y SIMULACION DE LA ESCUELA MEDIANTE *SIMEDIF para Windows*

Apenas finalizado el edificio se inició una primera campaña de mediciones con muy escaso instrumental (termómetros de mercurio). Es fundamental señalar que, a modo de experiencia educativa, las mediciones fueron realizadas por los propios alumnos bajo la dirección de sus maestros (Fig. 3), lo cual generó interés y compromiso por parte de los estudiantes. En este período la comunidad aún no contaba con red de gas natural (Filippín y De La Mata, 1995).

Luego de cinco años se inició un nuevo monitoreo térmico y energético, entre el 23 de agosto y el 6 de septiembre de 2003. Se midieron cada 15 minutos la temperatura en el interior de los locales y la temperatura ambiente exterior mediante sensores tipo HOBO y la radiación solar sobre superficie horizontal mediante un sensor LI-COR ubicado en la cubierta del edificio. En la Fig. 1 se representó con círculos la ubicación de los sensores de temperatura en los distintos locales de la escuela. Durante la primera semana el edificio se midió en condiciones reales de uso, con el aporte energético de los alumnos y el

encendido del sistema de calefacción en algunas áreas funcionales durante las primeras horas de la mañana. Durante la segunda semana el edificio estuvo desocupado, debido a cuestiones operativas. La campaña de medición estuvo acompañada por encuestas a los alumnos, registro de las horas de encendido y apagado del sistema de calefacción, entrevistas a directivos y maestros y la lectura del medidor de gas tres veces al día. A través de dichas lecturas se determinó que el consumo diario de gas de la escuela es de 2m^3 , valor cercano a los $1.6\text{m}^3/\text{día}$ estimado durante la etapa de prediseño mediante el método SLR de Relación Carga Térmica/Colector, descrito con detalle en Balcomb (1982). Una descripción más detallada del monitoreo de la escuela se encuentra en el trabajo de Filippin y Marek (2004), presentado a esta Reunión.



Figura 3. Interior del aula (izquierda) y alumnos realizando mediciones de temperatura (derecha).

La simulación se realizó mediante el programa *SIMEDIF para Windows* (Flores Larsen y Lesino, 2001). Se utilizaron los datos geométricos y constructivos del edificio y las condiciones climáticas monitoreadas durante el periodo. Los valores de los coeficientes de transferencia por convección-radiación fueron de $6\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ para las superficies internas no asoleadas y $16\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ para paredes exteriores (Duffie y Beckman, 1991). Durante la primera semana, el edificio estuvo ocupado, con lo que se incorporaron al análisis las ganancias internas de los alumnos, el uso del sistema de calefacción (oficina y pasillo) y la apertura y cierre de puertas. Para ello se consideró el aporte energético de $62\text{W}/\text{alumno}$ en las aulas y un aporte auxiliar de los calefactores de 7000Kcal del pasillo y de 3000Kcal de la oficina, que se encendió de lunes a viernes entre las 8 y las 11 de la mañana.

Durante la semana en que el edificio estuvo ocupado, los alumnos mantuvieron semiabiertas algunas ventanas de las aulas, para favorecer la ventilación y renovación del aire dentro del local. En *SIMEDIF* estas renovaciones de aire horarias pueden simularse mediante ganancias internas negativas, las cuales se estimaron mediante la expresión:

$$Q = - \frac{(\rho c_p)_{\text{aire}} (VN_R)_{\text{aula}} (T_{\text{aula}} - T_{\text{ext}})}{3600s} \quad (1)$$

en donde $(\rho c_p)_{\text{aire}}$ es el producto de la densidad y el calor específico del aire, V es el volumen del aula (158.35m^3), N_R es el número de renovaciones de aire del aula debido a la apertura de la ventana, que hemos supuesto del orden de 5 renovaciones/h (para ventanas semiabiertas las renovaciones van de 5 a 10/h), T_{aula} es la temperatura del aula y T_{ext} la temperatura exterior. Esta operación se repite hora por hora para cada una de las aulas para encontrar el calor a extraer de cada aula debido a la apertura de ventanas. De esta manera, con simulaciones sucesivas se detectó que las ventanas de algunas aulas se dejaron abiertas durante la noche.

Las Figs. 4 a 7 muestran el comportamiento térmico medido y la simulado de algunos de los locales del edificio. Los valores simulados y medidos ajustan en el orden de 0.5°C , con una buena predicción de las temperaturas medias y de las amplitudes térmicas en el interior de los locales.

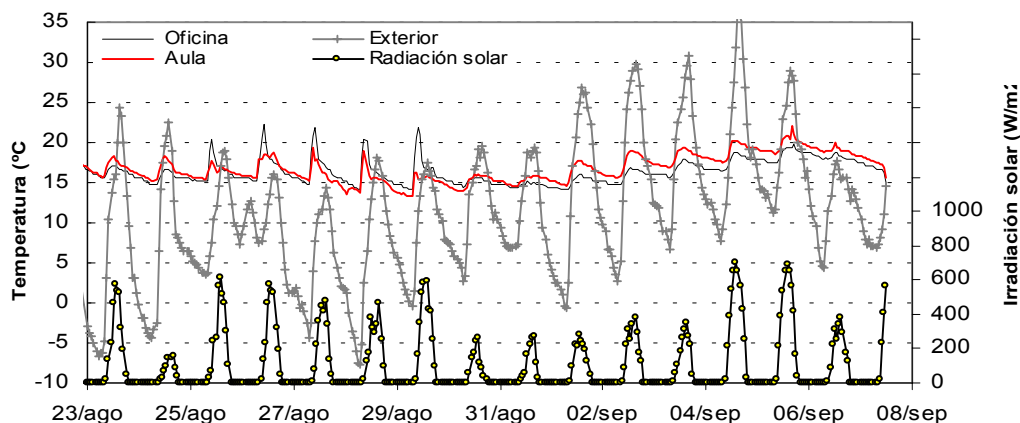


Figura 4. Datos medidos de las condiciones ambientales exteriores del periodo y temperatura de la oficina de Administración y de las aulas.

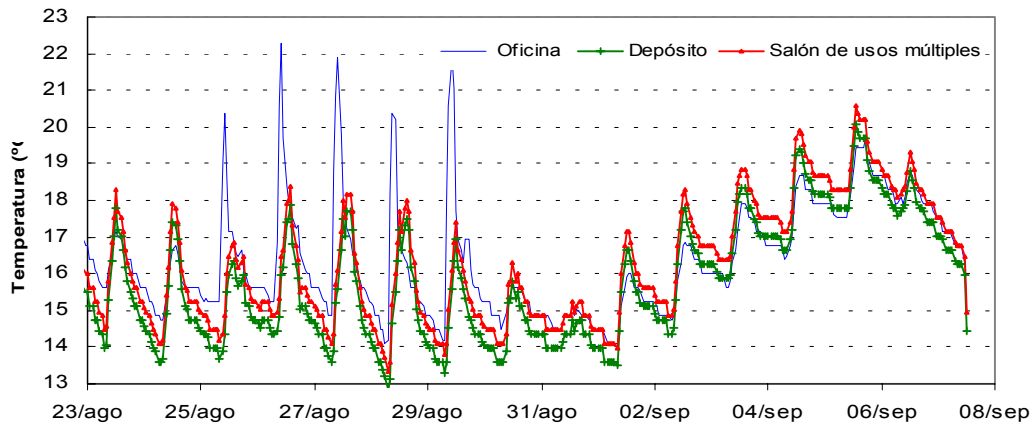


Figura 5. Datos medidos de la temperatura de los locales ubicados hacia el Sur del edificio: oficina de Administración, depósito y salón de usos múltiples.

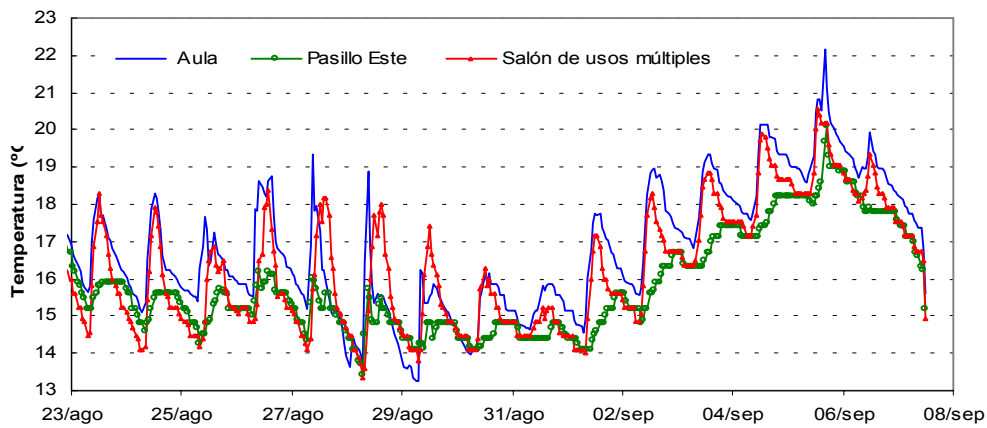


Figura 6. Datos medidos de la temperatura de los locales ubicados hacia el Este del edificio: salón de usos múltiples, pasillo y aula.

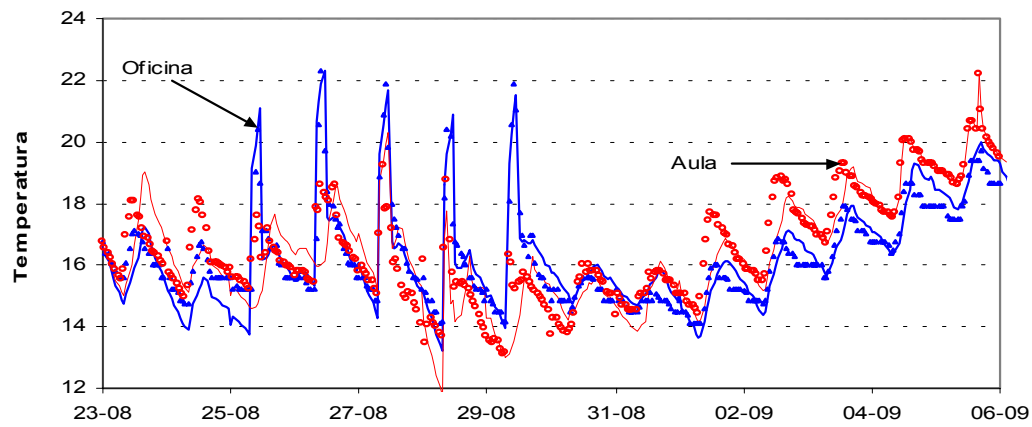


Figura 7. Datos medidos y simulación realizada mediante SIMEDIF para Windows para la oficina de administración y para el aula.

Las condiciones climáticas durante la primera semana (comprendida entre el lunes 25 y el domingo 31 de agosto) fueron rigurosas, con grandes amplitudes térmicas (máximas de 24°C y mínimas de -8°C) y temperaturas medias entre los 6 y 11°C, como se puede apreciar en la Fig. 4. En la segunda semana (1 al 6 de setiembre), sin actividad escolar, las condiciones climáticas externas fueron más benignas, con cuatro días en los que la temperatura aumentó significativamente respecto a la semana anterior hasta alcanzar una máxima de 36°C (Fig. 4), con un descenso de la temperatura exterior en el último día del periodo.

Las cuatro aulas tuvieron un comportamiento térmico semejante, por lo que en los gráficos sólo se reproduce el monitoreo de una de ellas, la cual es representativa de las cuatro. Los locales más fríos del periodo fueron los ubicados hacia el Sur (Figura 5): depósito (que no posee ganancia directa del Norte a través del quiebre de techo), oficina de administración y salón de recursos pedagógicos. La oficina escapó a esta situación solamente durante la primera semana, debido a que el uso de calefacción auxiliar aumentó su temperatura ubicándola como la más alta del edificio, con picos de hasta 23°C. Debido a la masa térmica del edificio, cuando se produjo un descenso de la temperatura ambiente exterior (25 al 27 de agosto), los locales del edificio mantuvieron su temperatura media sin sufrir enfriamiento apreciable.

Tabla 2. Temperaturas medias en °C de los locales durante las horas de ocupación, entre las 8:00hs y las 18:00hs.

Periodo	Aula 1	Aula 2	Aula 3	Aula 4	Pasillo Este	SUM	Oficina	Depósito	Exterior
1° Semana	16.6	16.7	16.7	16.7	15.3	16.3	17.1	15.8	13.3
2° Semana	18.4	18.5	18.5	18.5	16.7	17.8	17.2	17.3	19.8

Las temperaturas medias de las aulas durante el periodo de uso (de 8:00hs a 18:00hs) se mantuvieron alrededor de 16.7°C durante la primera semana. Entre la primera y segunda semana (sábado 30 y domingo 31 de agosto) se observó en las aulas un descenso de la temperatura interior, en correspondencia con la ausencia de las ganancias internas provenientes de los alumnos y el descenso de la radiación solar, que apenas alcanzó los 300 W/m². La media exterior durante los días laborales de esta segunda semana se ubicó alrededor de los 16.7°C. Para esta semana, sin ganancias internas y sin calor auxiliar, la temperatura de las aulas, orientadas hacia el Norte y con ganancia solar directa, fue 2°C más alta que la temperatura de la oficina, orientada hacia el Sur (Figura 4). Valores de temperaturas medias durante los periodos de ocupación (entre las 8:00hs y las 18:00hs) que reflejan los resultados discutidos se pueden analizar en la Tabla 2.

CONCLUSIONES

El monitoreo y simulación de la escuela en el periodo invernal permitió evaluar el efecto de las áreas vidriadas, de la orientación de los locales y del encendido de la calefacción en el comportamiento térmico del edificio. El periodo de estudio incluyó días en que la escuela estuvo desocupada y días en que estuvo en pleno funcionamiento, con el aporte de las ganancias internas de los alumnos y la calefacción. Es importante destacar también que cuando los edificios se encuentran en pleno funcionamiento aparecen parámetros de los que es muy difícil llevar un registro horario, como la apertura y cierre de puertas, la apertura de ventanas para ventilación, el oscurecimiento de las áreas vidriadas para evitar deslumbramiento, etc., factores que deben ser simplificados al momento de realizar la simulación del comportamiento térmico global del edificio. *SIMEDIF para Windows* permitió obtener resultados muy satisfactorios para ambos periodos (ocupado y desocupado).

Cuando el edificio se encontró desocupado, las ganancias solares directas elevaron 2.7°C la temperatura media de las aulas por encima del ambiente y 1.7°C la de los locales ubicados al Sur. Dicho incremento podría haber sido aún mayor de no ser por los bajos niveles de radiación observados durante los primeros tres días de la semana. Si a la ganancia solar se suman las contribuciones internas debido a la presencia de los alumnos y el sistema de calefacción, es de esperar que el aumento de la temperatura media de los locales sea aún mayor, como en el caso de la primera semana monitoreada, en que la media en el interior estuvo aproximadamente 8°C por encima de la media exterior. Simulaciones realizadas mediante *SIMEDIF* para esta primera semana (con mayor ganancia solar que la descripta previamente), considerando el aporte de los alumnos y del sistema de calefacción por separado, indican que en cada aula los alumnos contribuyeron con aproximadamente 1°C de incremento en la temperatura media, mientras que la estufa incrementó en 2.5°C la temperatura media de la oficina.

Para esta primera semana la temperatura promedio interior fue de 16°C y el consumo diario de energía en calefacción estuvo alrededor de 0.009m³/m² construido. La encuesta socioambiental realizada indica que, si bien suelen considerarse para el diseño temperaturas mínimas de confort alrededor de los 18°C, en este caso particular los alumnos y docentes encuestados dicen encontrarse en situación de confort térmico y lumínico: aún con la posibilidad de poner en funcionamiento los calefactores, éstos permanecen apagados la mayor parte del tiempo por considerarse innecesarios (Filippín y Marek, 2004). El consumo de gas observado, que se mantuvo dentro de los mismos valores en los últimos años, corresponde a un 90% de ahorro respecto a una escuela de diseño y tecnología convencional para la región en estudio (Filippín et al., 1993; Filippín y De La Mata, 1995), con lo cual se alcanzó exitosamente el objetivo primordial de diseñar un edificio energéticamente eficiente cuyo costo no superara al de una obra convencional.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo parcialmente financiado por ANPCYT PICT2000 13-09991 y por CIUNSa 1088.

REFERENCIAS

- Balcomb, J.D., Jones, R.W., Kosiewicz, C.E., Lazarus, G.S., McFarland, R.D., Wray W.O., (1982). *Passive Solar Design Handbook-Vol3*. ASES, Inc. Boulder. N.Y.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª Edición. Wiley Interscience, New York.
- Filippín, C., Esteves, A., Pattini, A. y De Rosa, C. (1993). Primera Experiencia de una Escuela Solar en un Ecosistema Árido de la Provincia de La Pampa. En *Actas de la XVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, La Plata, Argentina, 1: 189 - 197.

- Filippín, C. y De La Mata, M. (1995). Primera Experiencia de una Escuela Solar en un Ecosistema Árido de la Provincia de La Pampa. Primeros Resultados. En Actas de la XVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, San Luis, Argentina, 1: 02.61-02.67.
- Filippín, C. y Marek, L. (2004). Monitoreo higrotérmico, energético y socioambiental de una escuela solar en la provincia de La Pampa. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, año 2004.
- Flores Larsen S. y Lesino G. (2001). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. Revista ERMA *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 9, pp.15-24, ISSN 0328-932X.

ABSTRACT: The monitoring and simulation of the thermal behavior of a school at the northwest of La Pampa for a winter period are presented. The passive strategies applied in the building design were: direct solar gain, solar control, thermal mass and insulation of the building envelope, daylighting and natural ventilation. The studied weeks includes two different periods: days when the building was unoccupied and days when the school was under real conditions of use, with the presence of students and the use of the heating system. During this period shading devices were not used. The transient thermal simulation was performed with *SIMEDIF for Windows*. The monitoring and thermal simulation of the building allowed to evaluate the performance of the glazed areas, the rooms orientation, and the use of the heating system. The daily energy consumption was $0.009\text{m}^3/\text{m}^2$ of builded area, so a 90% of energy saving is reached, compared with a conventional school for this region.

Keywords: bioclimatic buildings, passive conditioning, natural climatization, thermal simulation.