GRADOS-DÍA EN ARQUITECTURA

Víctor Armando Fuentes Freixanet

INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de diseño bioclimático, los análisis del clima, del sitio y del usuario, son muy importantes, ya que a partir de sus resultados y conclusiones se definirán las estrategias, los conceptos de diseño y el partido arquitectónico. El análisis climático tiene varias etapas: la primera es la recopilación de datos. La revisión, depuración y selección de la información significativa es importante en esta etapa. La complementación de datos faltantes, por medio de la estimación y cálculo es la siguiente tarea por realizar seguida por la ordenación adecuada para su análisis.

La siguiente etapa, el análisis propiamente, debe hacerse de manera numérica y gráfica, y desde distintos ángulos: el análisis paramétrico, el análisis mensual, y el análisis de variables interrelacionadas. Finalmente se cruzan los resultados obtenidos para llegar a una síntesis de caracterización climática y así lograr la definición de estrategias de diseño bioclimático. Esto se alcanza a través del uso de distintos método y herramientas complementarias que nos van aproximando a la comprensión del problema y a las soluciones particulares.

De esta forma se tiene el índice ombrotérmico, el cual relaciona la temperatura con la precipitación; la carta bioclimática que relaciona a la temperatura con la humedad, los triángulos de confort que relacionan a la temperatura con la oscilación o amplitud térmica, etc. Otra aproximación al estudio del clima y a la definición de requerimientos bioclimáticos es el concepto de Grados-Día, el cual relación a la temperatura con respecto a los límites de confort o de climatización.

Los Grados-Día han sido poco utilizados en el campo de la arquitectura bioclimática en México, por ello el objetivo de este trabajo es presentarlos de manera accesible para apreciar sus ventajas y promover su uso.

¿QUÉ SON LOS GRADOS-DÍA?

Los Grados-Día (también citado como Días-Grado) es un parámetro importante a considerar para la definición de las estrategias de diseño, los requerimientos de climatización (natural o artificial) y por lo tanto la demanda de energía de una edificación. Los Grados-Día se pueden definir como los requerimientos de calentamiento o enfriamiento (en grados centígrados o Kelvin[1]), necesarios para alcanzar la zona de confort, acumulados en un cierto período de tiempo (generalmente un mes, aunque podrían ser semanales, o incluso horarios).

De esta forma se puede tener dos tipos de Grados-Día: de calentamiento o de enfriamiento.

[1] Los intervalos en las escalas Celsius y Kelvin son iguales. De tal forma, por convención los datos puntuales en la escala de temperatura se definen en grados Celsius, mientras que las diferencias térmicas o intervalos se definen en Kelvin. Sin embargo para evitar confusión en los lectores, en este texto se usaran grados Celsius para Grados-Día, y Kelvin para conductancias y coeficientes de transmisión-U.

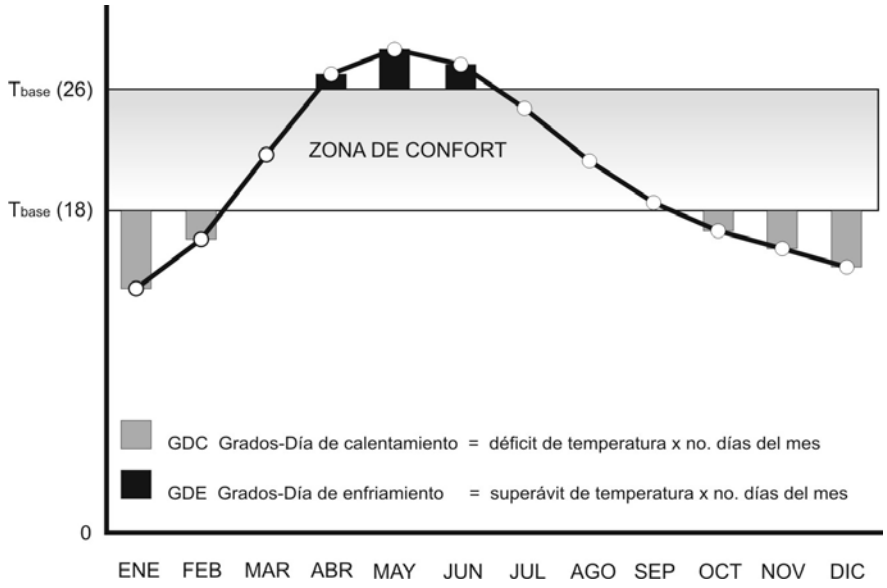


Fig. 1. Esquema de Grados-Día de calentamiento y enfriamiento

Estrictamente hablando, los Grados-Día se refieren al déficit o superávit acumulado de los 365 días del año[2], es decir[3]:

$$GD = \sum_{1}^{365} \left(T - T_{base} \right)$$

donde:
GD = Grados-Día (°C)
T_{base}= Temperatura base (límite de referencia, inferior o superior de confort (°C)
T = Temperatura media diaria (°C)

Aunque también puede analizarse de manera desagregada mes por mes:

$$GD = \sum_{1}^{n} \left(T - T_{base} \right)$$

donde:
n = número de días del mes

Cuando no se cuenta con información diaria se pueden utilizar los datos mensuales de temperatura multiplicados por el número de días de mes, ya que estos datos representan el promedio de todos los días del mes.

---

2 C.f. Szokolay, Steven. (2004) Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design Elsevier-Architectural Press. Great Britain. p. 32

3 Nótese que si el signo es negativo, el resultado implica únicamente que la temperatura media está por debajo de la temperatura base y por lo tanto se presentan requerimientos de calentamiento. Por el contrario si el resultado es positivo significa un superávit de temperatura lo que representa requerimientos de enfriamiento. Si la temperatura se encuentra entre los límites inferior y superior de confort los Grados-Día son iguales a cero, es decir que no hay requerimientos de climatización. En realidad, los Grados-Día son rangos de temperatura por lo que generalmente se utiliza la unidad kelvin en lugar de grados Celsius (aunque ambas unidades son válidas) del mismo modo pueden considerarse de manera absoluta (sin signo) pero diferenciando si son de calentamiento o enfriamiento.

$$GD = n \cdot \left(T_{mensual} - T_{base}\right)$$

Habrá ocasiones en que se requiera mayor precisión, en estos casos el análisis puede hacerse de manera horaria, ya sea de manera acumulada anual (de 1 a 8,760 horas) o mensual (de 1 a (n x 24 horas)), en este caso se denominan Grados-hora:

$$Gh = \sum_{1}^{8,760} \left(T_{horaria} - T_{base}\right)$$

donde:
Gh = Grados-hora (°C)
T_{base}= Temperatura base (límite de referencia, inferior o superior de confort (°C)
$T_{horaria}$ = Temperatura horaria (°C)

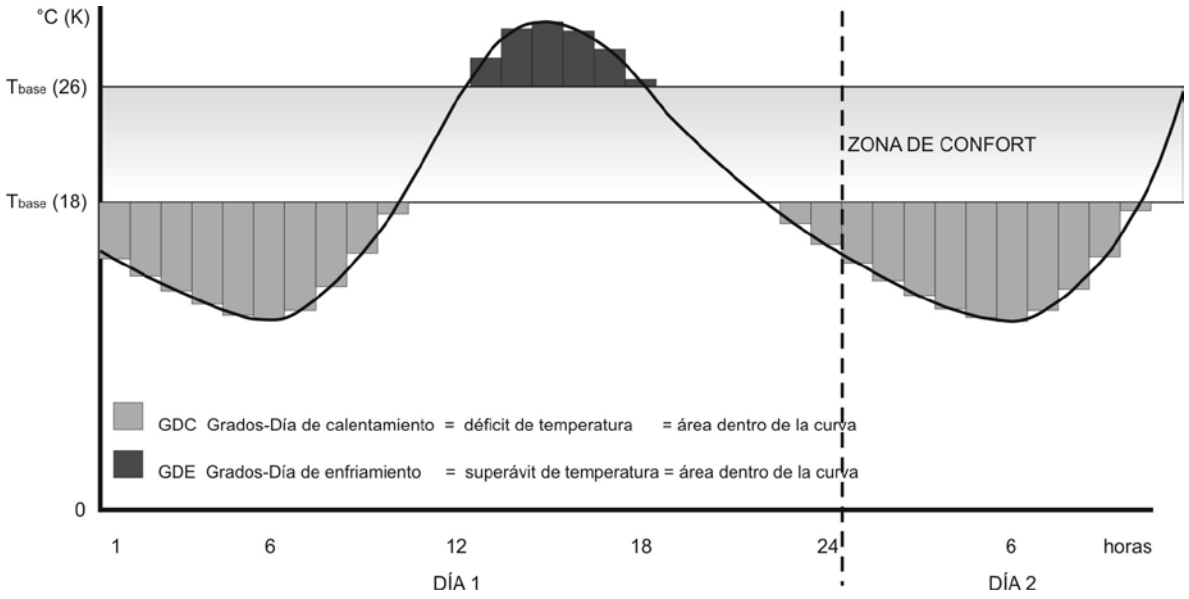


Fig. 2. Esquema de Grados-hora de calentamiento y enfriamiento

Debido a que en la mayoría de los casos no se cuenta con datos horarios día por día de todo el año y ya que generalmente los estudios bioclimáticos no requieren tanta precisión, los Grados-hora pueden considerarse como los Grados-Días multiplicados por 24 horas, es decir:

$$Gh = GD \times 24$$

GRADOS-DÍA DE CALENTAMIENTO

Los Grados-Día de calentamiento se pueden definir como el déficit de temperatura, acumulado en un cierto periodo de tiempo, es decir los grados centígrados por debajo del límite inferior de la zona de confort acumulados en un mes.

Para el cálculo de los Grados-Día de calentamiento generalmente se toma como temperatura base inferior (de confort) 18 °C[4]. Esta temperatura es genérica y aplicable sobre todo en casos en donde el objetivo es comparar este índice entre varias ciudades, porque de esta forma la comparación se hace bajo los mismos criterios; aunque para análisis particulares se puede usar como temperatura base de referencia el límite inferior de la zona de confort de acuerdo a la fórmula propuesta por Auliciems[5]:

$$Tn = 17.6 + 0.31\overline{T}$$

$$Zc = Tn \pm 2.5$$

donde:
Tn = Temperatura neutra (°C)
T = Temperatura media (anual o mensual) (°C)
Zc = Zona de confort (°C)

De acuerdo a la definición, la fórmula para el cálculo de los Grados-Día de calentamiento es:

$$GD_{cal} = n\left(T - T_{base}\right)$$

donde:
GD_{cal} = Grados-Día de calentamiento (°C día)
n = número de días que tiene el mes de análisis
T = Temperatura media mensual (°C)
T_{base} = Temperatura base (mínima de confort = Tn – 2.5) (°C)

Sin embargo, el sólo uso de la temperatura media es poco significativo, ya que no se considera la oscilación o amplitud térmica. En el Reino Unido se utilizan las siguientes fórmulas para determinar los Grados-Día[6], en donde se toman en cuenta la temperatura mínima y máxima, lo cual da un resultado más real y preciso de los requerimientos de calentamiento.

---

[4] La temperatura base para determinar los Grados-Día, y por lo tanto requerimientos de climatización, varía de país a país de acuerdo a sus reglamentos, estándares y normatividades energéticas y laborales. Por ejemplo en el Reino Unido se utiliza 15.5 °C como temperatura base para determinar los Grados-Día de calentamiento (sólo para hospitales se utiliza 18.5 °C). Mientras que en Estados Unidos se toma como base 65 °F (18.33 °C); sin embargo de manera genérica se adopta 18 °C como límite. Como se puede apreciar la temperatura base no se refiere necesariamente a la temperatura de confort, sino a la temperatura a partir de la cual empezarán a funcionar los equipos de climatización.
Cf. Degree Days for Energy Management – practical introduction. Technology Guide CTG004. Carbon Trust. Crown UK. 2007.

[5] A. Auliciems (1981). Towards a psycho-physiological model of thermal perception. International Journal of Biometerorology., 26 (suppl.) p 68-86

[6] Vilnis Vesma. The Energy Management Register. http://www.vesma.com

Tabla 1. Fórmulas para determinar los Grados-Día de calentamiento

	Condición	Fórmula utilizada
1	$T_{max} < T_{base}$	$GD_{cal} = T_{base} - \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right)$
2	$T_{max} \geq T_{base}$	$GD_{cal} = \left(\frac{T_{base} - T_{min}}{2}\right) - \left(\frac{T_{max} - T_{base}}{4}\right)$
3	$(T_{max}+T_{min})/2 > T_{base}$	$GD_{cal} = \left(\frac{T_{base} - T_{min}}{4}\right)$
4	$T_{min} > T_{base}$	$GD_{cal} = 0$

donde:
GD_{cal} = Grados-Día de calentamiento (déficit de temperatura) (°C)
T_{min} = Temperatura mínima (°C)
T_{max} = Temperatura máxima (°C)
T_{base} = Temperatura base (mínima de confort) (18 °C)

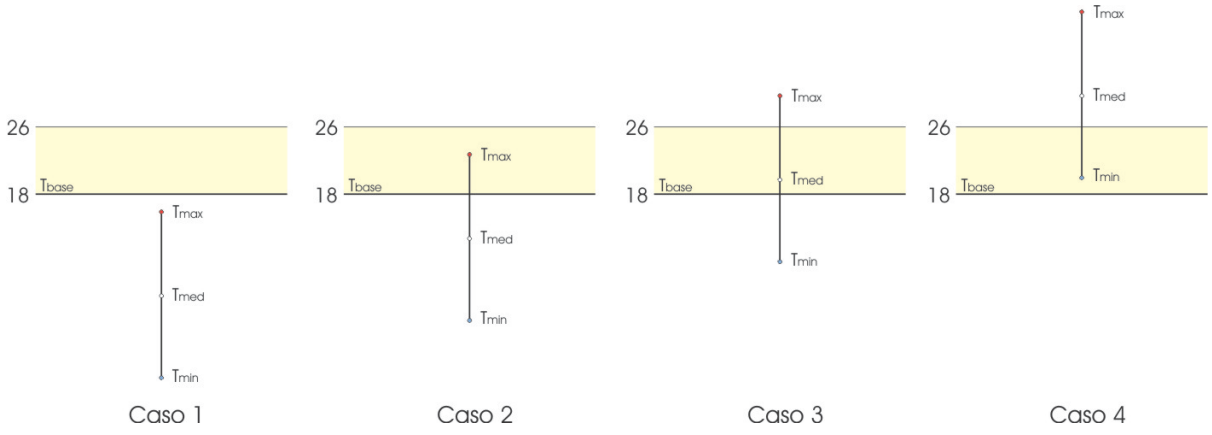
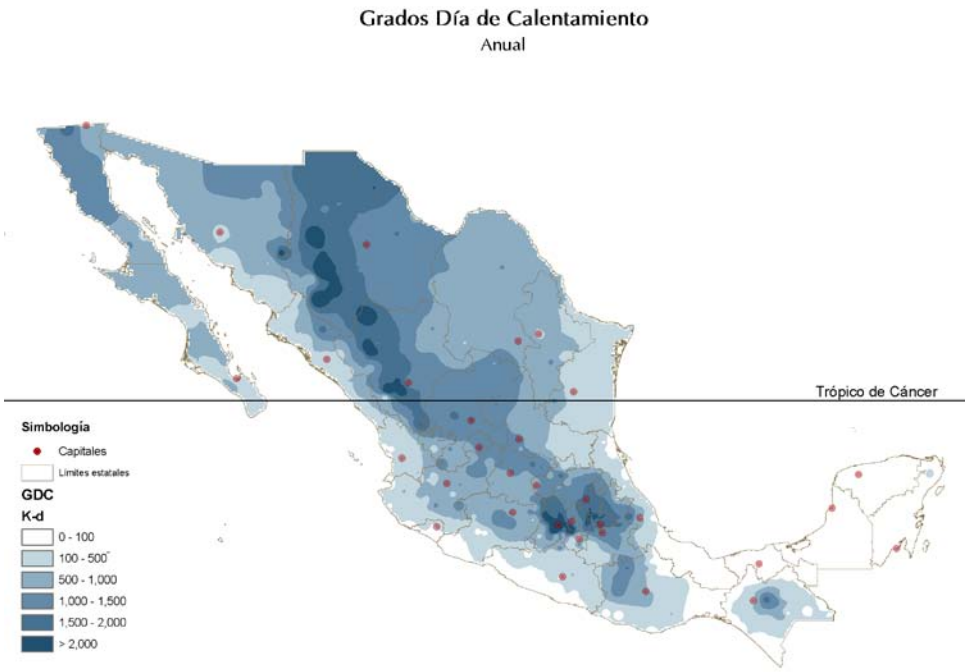
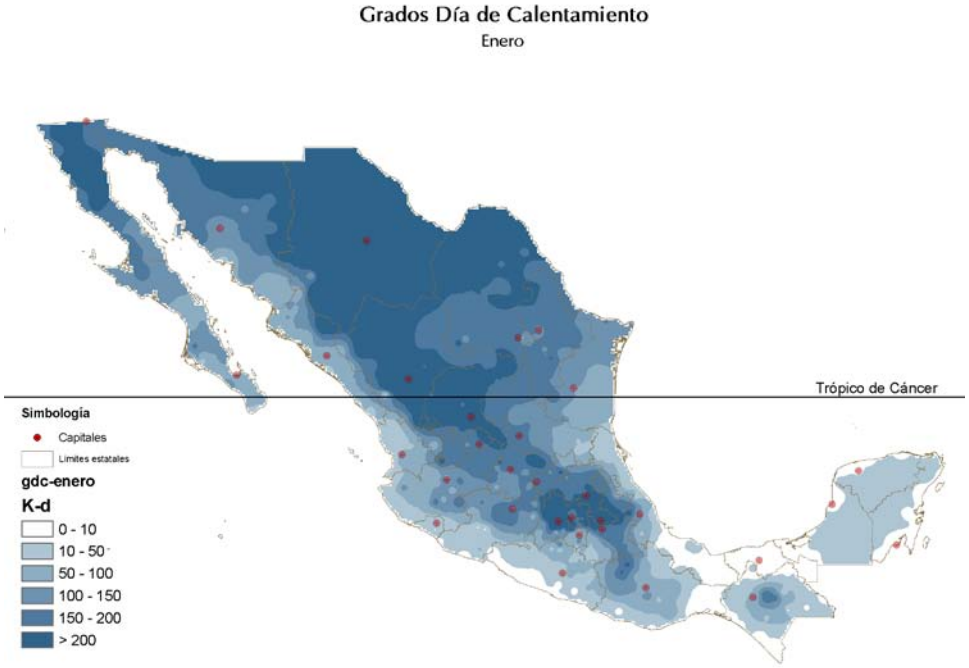


Fig. 3. Casos para la determinación de los Grado-Día de calentamiento

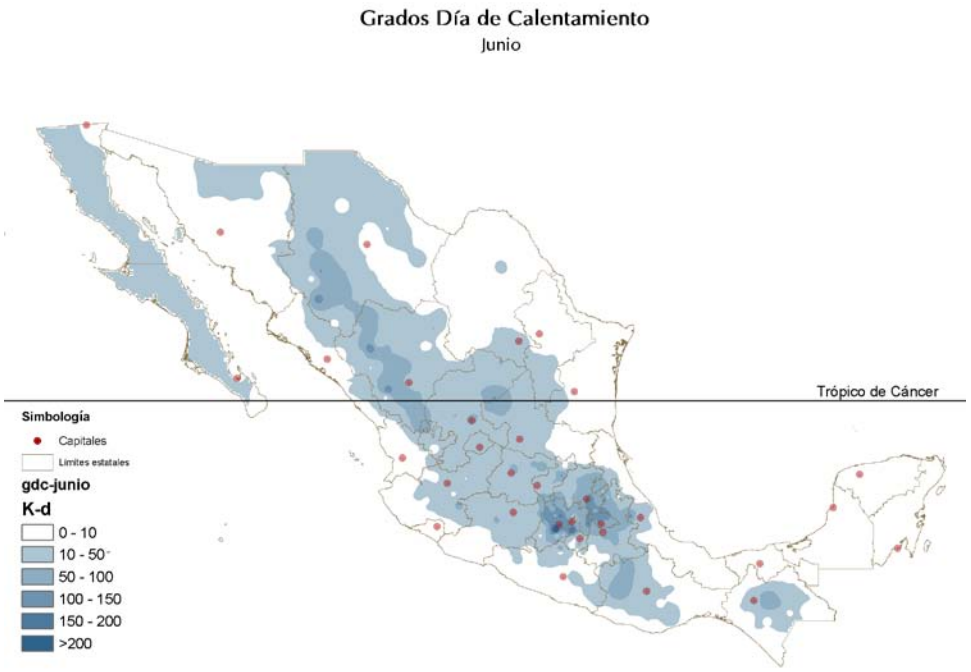
De acuerdo con estas fórmulas se elaboraron los mapas de Grados –Día de calentamiento para la República Mexicana, considerando la temperaturas medias anuales y para los meses de enero y junio.



Mapa 1. Grados-Día de calentamiento – temperatura anual



Mapa 2. Grados-Día de calentamiento – enero



Mapa 3. Grados-Día de calentamiento – junio

GRADOS-DÍA DE ENFRIAMIENTO

Los Grados-Día de enfriamiento se pueden definir como el superávit de temperatura, acumulado en un cierto periodo de tiempo, es decir los grados centígrados por arriba del límite superior de la zona de confort, acumulados en un mes.

Para el cálculo de los Grados-Día de enfriamiento generalmente se toma como temperatura base superior (de confort) 26 °C. Esta temperatura se usa de manera genérica, aunque para análisis particulares se puede usar como temperatura base de referencia el límite superior de la zona de confort de acuerdo a la fórmula propuesta por Auliciems citada arriba.

De acuerdo a la definición la fórmula para el cálculo de los Grados-día es:

$$GD_{enf} = n\left(T - T_{base}\right)$$

donde:
GD_{enf} = Grados-Día de enfriamiento (°C día)
n = número de días que tiene el mes de análisis
T = Temperatura media mensual (°C)
T_{base} = Temperatura base (máxima de confort = Tn + 2.5) o (26°C)

Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, el uso de la temperatura media es poco significativo. En el Reino Unido utilizan las siguientes fórmulas para determinar los Grados-Día de enfriamiento[7], en donde toman en cuanta la temperatura mínima y máxima, lo cual da un resultado de requerimientos de enfriamiento más reales.

Tabla 2. Fórmulas de Grados-Día de enfriamiento

	Condición	**Fórmula utilizada**
1	$T_{min} > T_{base}$	$GD_{enf} = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right) - T_{base}$
2	$T_{min} \leq T_{base}$	$GD_{enf} = \left(\frac{T_{max} - T_{base}}{2}\right) - \left(\frac{T_{base} - T_{min}}{4}\right)$
3	$(T_{max}+T_{min})/2 < T_{base}$	$GD_{enf} = \left(\frac{T_{max} - T_{base}}{4}\right)$
4	$T_{max} < T_{base}$	$GD_{enf} = 0$

donde:
GD_{enf} = Grados-Día de enfriamiento (superávit de temperatura) (°C)
T_{min} = Temperatura mínima (°C)
T_{max} = Temperatura máxima (°C)
T_{base} = Temperatura base (máxima de confort) (26 °C)

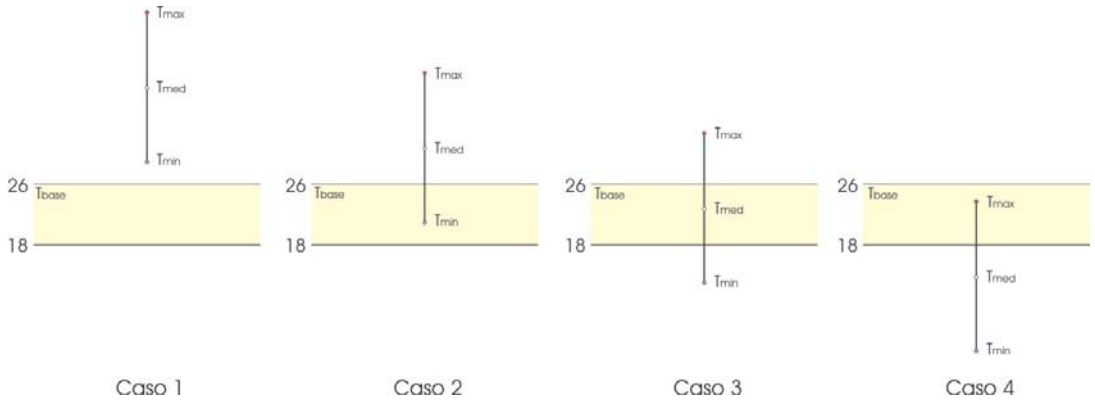
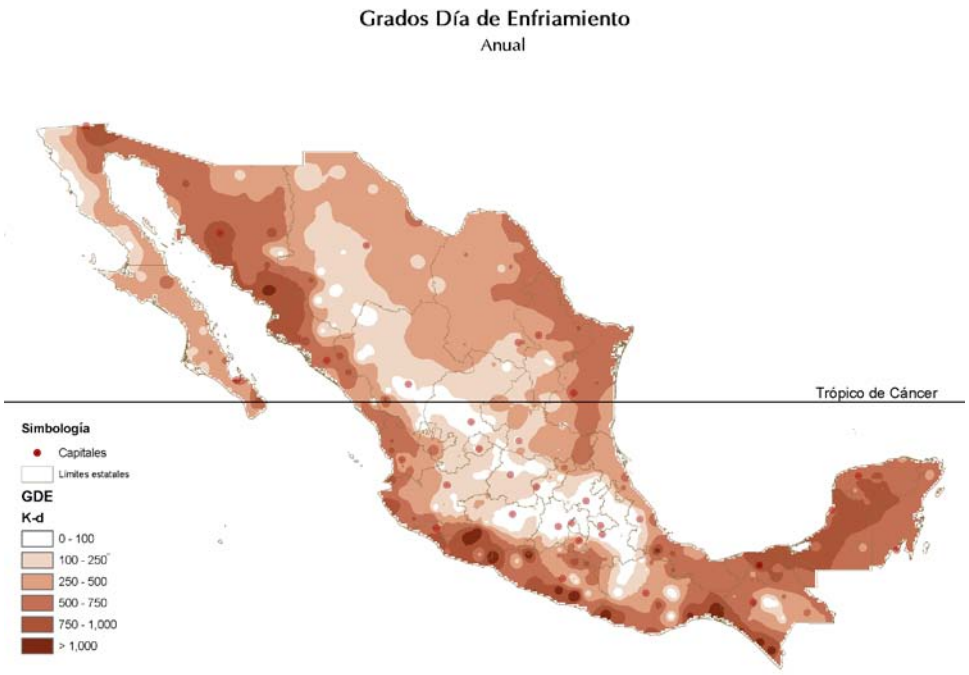


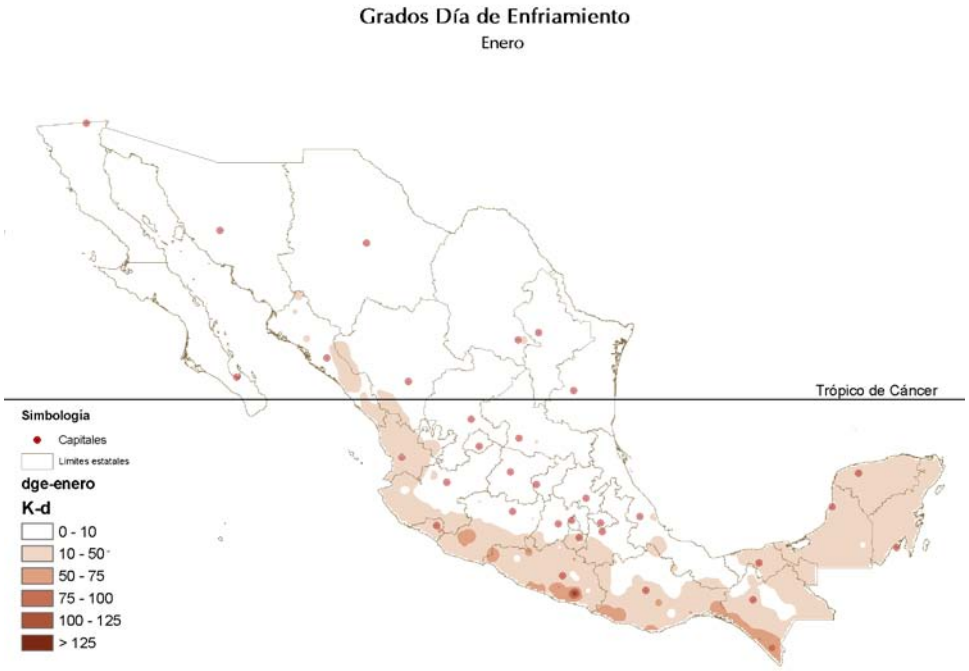
Fig. 4. Casos para la determinación de los Grado-Día de enfriamiento

[7] Vilnis Vesma. The Energy Management Register. http://www.vesma.com

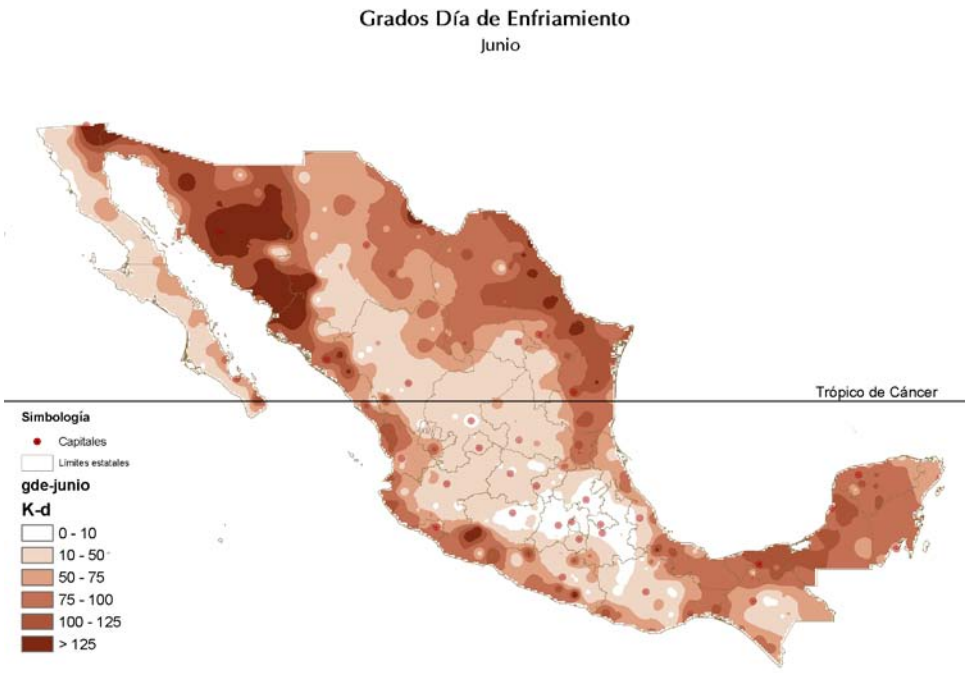
De acuerdo con estas fórmulas se elaboraron los mapas de Grados–Día de enfriamiento para la República Mexicana, considerando las temperaturas medias anuales y para los meses de enero y junio.



Mapa 4. Grados-Día de enfriamiento- anual



Mapa 5. Grados-Día de enfriamiento – enero



Mapa 6. Grados-Día de enfriamiento - junio

EL USO DE LOS GRADOS-DÍA

A partir de los Grados-Día y particularmente de los Grados-hora es posible determinar los requerimientos de calentamiento de una edificación. De acuerdo a Szokolay[8], estos requerimientos se pueden determinar al multiplicar los Grados-hora por la conductancia del edificio (tasa de pérdida de calor específica):

$$Rc = Gh \times q$$

Donde:
Rc = Requerimientos de calentamiento (Wh)
Gh = Grados-hora (°C h)
q = Conductancia del edificio (W/K)

La conductancia del edificio es la suma de la conductancia de la envolvente mas la conductancia por ventilación.

$$q = qc + qv$$

[8] Szokolay (2004) Op. Cit.

Donde:
q = Conductancia del edificio (W/K)
qc = Conductancia de la envolvente = Σ(A x U) (W/K)
qv = Conductancia por ventilación = 1,200 x tv (W/K)
1,200 = Capacidad calorífica volumétrica del aire húmedo (J/m^3 °C)
tv = tasa de ventilación = N x V / 3,600 (m^3/s)
N = Número de cambios de aire por hora
V = Volumen de la habitación (m^3)

Si asumimos que los Grados-hora son igual a Gh = GD x 24, entonces se puede decir que una unidad de conductancia (W/K) del edificio equivale a 0.024 kWh por cada Grado-Día.

Por ejemplo, si suponemos una casa habitación de 100 m^2 en un nivele, con una planta aproximada de 10 m x 10 m y 2.5 m de altura; con 30% de acristalamiento en sus fachadas, se tiene:

Elemento	Superficie (m^2)	Coef. de Transmisión U (W/m^2K)	Conductancia de la envolvente - *qc* (W/K)
Techumbre	100	1.07	107
Muros	70	1.93	135
Ventanas	30	5.40	162
Puertas	4	3.74	15
		Σ =	**419**

Suponiendo una renovación de aire de 10 cambios por hora, se tendría una conductancia por ventilación de:

$$qv = \frac{1200}{3600}\left(6 \times 250\right) \quad = 500\,(W/K)$$

Por lo tanto la conductancia de edificio es 419 + 500 = 919 W/K, entonces el requerimiento de calentamiento será de 919 x 0.024 = 22.056 kWh por Grado-Día. Suponiendo que se tiene en el mes de análisis 235 Grados-Día de calentamiento, entonces el requerimiento mensual total (o pérdidas de calor que tienen que ser compensadas) será = 22.056 x 235 = 5183.16 kWh

Con el fin de evaluar el impacto de cada elemento dentro del requerimiento de calentamiento total se pueden hacer las operaciones de manera desagregada:

Elemento	Conductancia de la envolvente - *qc* (W/K)	Pérdidas de calor o Requerimiento de calefacción (kWh)	Porcentaje (%)
Techumbre	107	603.48	11.7
Muros	135	761.40	14.7
Ventanas	162	913.68	17.6
Puertas	15	84.60	1.6
Ventilación	500	2,820.0	54.4
		5,183.16	**100.0**

De esta forma se puede evaluar la eficiencia de los elementos al hacer modificaciones. Supongamos que asilamos el muro por medio de un tablero de espuma de poliestireno de 12 mm, logrando una reducción del coeficiente U = 0.79 W/m^{2}K, es decir un coeficiente del muro de U = 1.93 – 0.79 = 1.14 W/m^{2}K que multiplicado por el área se tiene una conductancia del elemento de 1.14 x 70 m^2 = 79.8 W/K; lo que equivale a 79.8 x 0.024 x 235 = 450.1 kWh en lugar de 761.40 kWh, lo que representa un reducción de 761.40 – 450.1 = 311.3 kWh y aproximadamente el 6%.

Por otro lado si la ventilación se limitara a 4 cambios por hora, la conductancia por ventilación sería de 333.33 (W/K) con pérdidas de calor iguales a 333.33 x 0.024 x 235 = 1,880 kWh lo que implica una reducción en las pérdidas de calor de 2,820 – 1880 = 940 kWh, aproximada el 18 % con respecto al total.

Otra forma de utilizar los Grados-Día es para evaluar los consumos energéticos, supervisarlos de manera regular para detectar posibles fallas o incrementos no justificados y hacer uso eficiente de la energía.

El primer paso es recopilar datos de los consumos energéticos del edificio. Esto se puede hacer tomando lecturas manualmente, automáticamente a través de algún sistema adquiridor de datos o simplemente a través de los recibos de consumo eléctrico.

En seguida se deben comparar los consumos de energía con los Grados-Día por medio de una gráfica de dispersión. Se puede observar (fig. 5) que los puntos están dispuestos en un acomodo diagonal cuya tendencia puede ser descrita a través de una línea recta de tipo y = mx + c. Esta línea de tendencia tiene dos componentes importantes: su pendiente (m) y su intersección con el eje vertical (c). La pendiente expresa que tanta energía se utiliza en el espacio en función de las condiciones climáticas representadas por los Grados-Día. Si se considerara exclusivamente el consumo de energía para climatización, sería de suponer que a cero Grados-Día no habría consumo de energía, siendo éste igual a cero. Esto significa que la intersección de la línea en el eje de las ordenadas es el consumo de energía debido a usos no relacionados con la climatización (iluminación, equipos electrodomésticos, etc.)[9].

Tabla 2. Grados-Día y consumo eléctrico mensual

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
GD	235	203	187	155	133	118	133	133	128	158	192	219
kWh	5,645	4,965	4,784	4,002	3,921	3,525	3,682	3,521	3,421	4,302	4,623	5,326

[9] Si se tuviera una auditoría energética, los consumos eléctricos podrían desagregarse y ser estudiados detalladamente por separado.

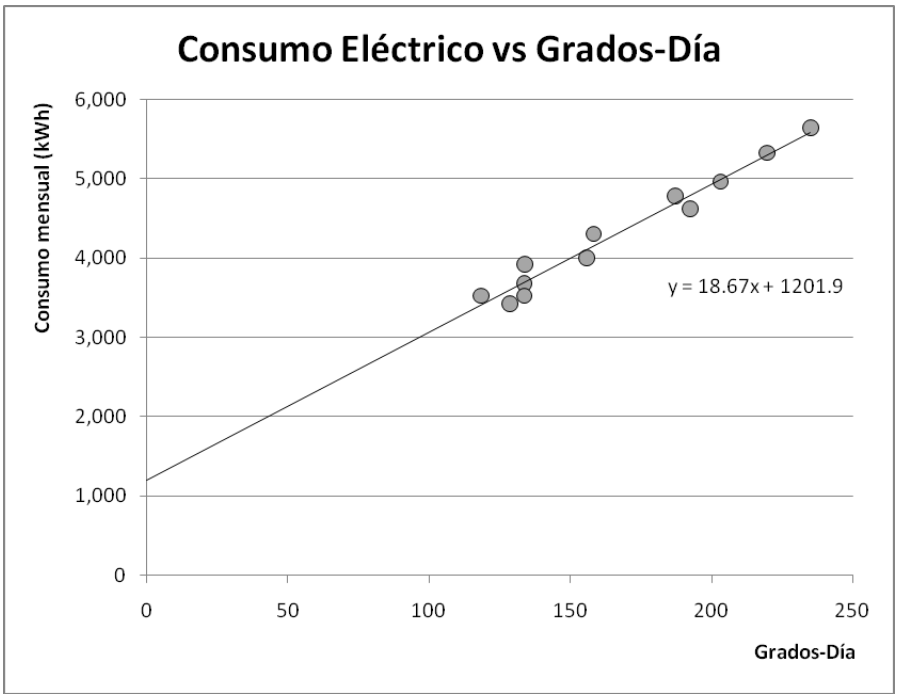


Fig. 5 Gráfica de dispersión: Consumo eléctrico contra Grados-Día

Lo común es que la distribución de puntos no estén demasiado dispersos y que la intersección de línea de tendencia (o comportamiento del consumo) se de en la línea de las ordenadas. Si los datos están muy dispersos es conveniente revisar los datos de las lecturas de consumo y verificar la congruencia entre los intervalos de tiempo, si hay equipos nuevos que impliquen un consumo adicional o si hay cambios en los patrones y hábitos de consumo. Si la línea de tendencia presenta su intersección con la línea de los Grados-Día (abscisas) significaría que el edificio no requiere de energía para calefacción sino hasta haber alcanzado ciertos Grados-Día. Esto podría deberse a que la carga interna es suficiente o que el edificio está suficientemente aislado para responder adecuadamente a un cierto límite de eficiencia con respecto al ambiente exterior.

La gráfica realizada sirve como un elemento de control o supervisión de los consumos futuros. Si se grafican subsecuentemente los consumos mensuales que se van teniendo, se podrá verificar que sigan el mismo patrón esperado de acuerdo a la línea de tendencia. Si en algún momento hubiera algún punto que se “dispare” o salga del patrón esperado, esto será una alarma para revisar los equipos eléctricos en busca de algún mal funcionamiento, lo que permitirá hacer las correcciones o reparaciones necesarias, ya que de no hacerlo, todos los consumos subsecuentes se verían afectados.

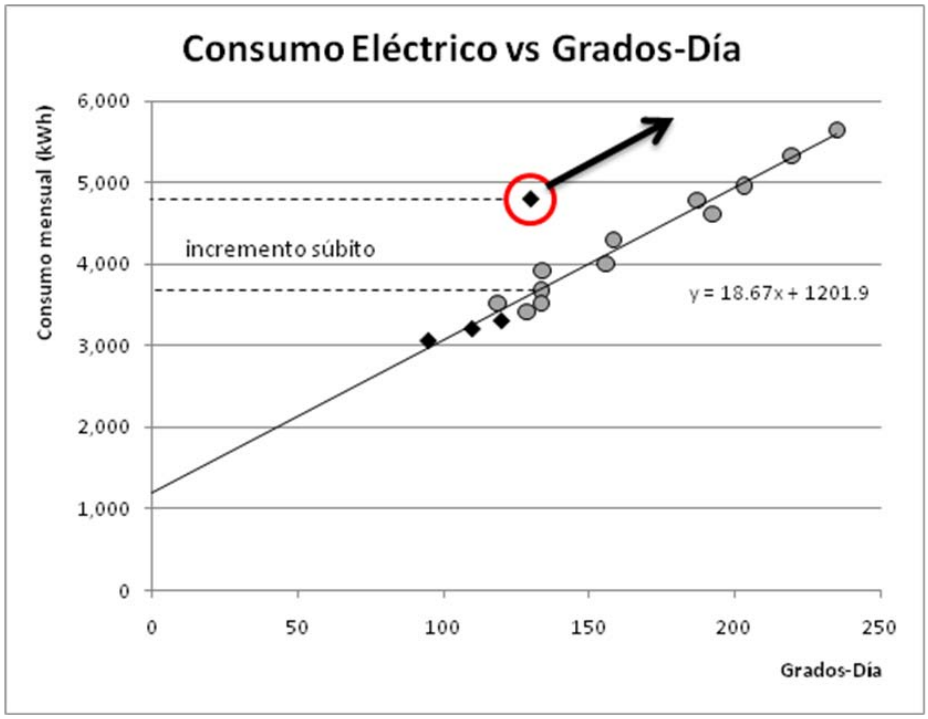


Fig. 6 Gráfica de Dispersión: Incremento súbito del consumo eléctrico

Hacer cálculos de requerimientos de enfriamiento a partir este método de Grados-Día es complicado ya que, además de las variables de conductancia y ventilación, también interviene de manera importante la ganancia solar, (la cual depende de la orientación, forma, acristalamientos, etc. particulares de cada edificación). Además también se tienen que considerar las ganancias internas y la humedad del aire, la cual determina la carga por calor latente. Por tal motivo es más conveniente utilizar otros métodos de cálculo térmico que consideran todas estas variables.

CONCLUSIÓN

Sin duda los Grados-Día son una herramienta importante que puede aportarnos información útil para la toma de decisiones de diseño y para la evaluación y supervisión del uso de la energía en edificaciones ya construidas.

Los análisis de Grados-Día no son excluyentes de todos los análisis que se elaboran en el proceso de diseño bioclimático. Toda la información es complementaria y nos aproxima a la mejor solución de los problemas ambientales y climáticos que debemos solucionar en cada caso en particular.

BIBLIOGRAFÍA:

Auliciems, A. (1981). Towards a psycho-physiological model of thermal perception. International Journal of Biometerorology., 26 (suppl.)

Degree Days for Energy Management – practical introduction. (2007). Technology Guide CTG004. Carbon Trust. Crown UK.

Szokolay, Steven. (2004) Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design Elsevier-Architectural Press. Great Britain.

Vilnis Vesma. The Energy Management Register. http://www.vesma.com (accessed May 2009)