

# **Estudio del microclima de la cueva de Mendukilo. Astiz. Navarra. Dos años de mediciones. Periodo Enero 2006 – Diciembre 2007.**

Vladimir Otero Collazo\* [vlado6208@yahoo.es](mailto:vlado6208@yahoo.es)

Jabier Les Ortiz de Pinedo\* [jabierles@sociedadalfonsoantxia.org](mailto:jabierles@sociedadalfonsoantxia.org)

Rakel Malanda Ruiz\* [rakelcvmate@yahoo.es](mailto:rakelcvmate@yahoo.es)

**\* *Sociedad de Ciencias Espeleológicas Alfonso Antxia***

## **1. Introducción.**

La continuidad de los estudios climáticos en las cuevas, es fundamental para la determinación de los modelos de circulación e intercambio energético de la masa gaseosa con el resto de los sistemas. La caracterización del comportamiento de las variables meteorológicas, procesos y efectos sólo puede ser posible tras varios años de colecta de datos y su interpretación.

Durante el primer año de estudios se definieron algunas características climáticas de la cueva, como la zonación, atendiendo principalmente al comportamiento de las variables meteorológicas y su interrelación, la influencia del sistema exterior sobre el ambiente hipogeo y los mecanismos de intercambio de masa y energía.

En la cueva Mendukilo existe una zonación bien diferenciada desde el punto de vista climático, representada por:

- Sala Entrada: Zona de transición desde el exterior hacia el interior de la cueva. Es el sector de mayor influencia del clima epigeo sobre el hipogeo, donde se aprecian las mayores variaciones de la temperatura y la humedad relativa.
- Sector profundo: Representado por Laminosin y Herensugea. Es el sector más estable desde el punto de vista climático. Aunque presenta una cierta influencia desde el medio epigeo, esta se aprecia minimizada por factores que autorregulan el clima como la matriz rocosa de la cavidad, la morfología de la cueva y los volúmenes de las salas.
- Sector de mezcla de fluidos representado por la galería de acceso, donde se confluyen las masas gaseosas de los sectores profundos y la sala de entrada.

El régimen natural de las temperaturas en el interior de la cueva prácticamente no es alterado por los grupos de visitantes, manteniendo un rango máximo de variación anual de 0,75 °C, en el interior de la cueva, es decir, en las zonas más estables, con mayor amplitud en la sala Herensugea, siendo más estable en Laminosin.

El comportamiento de la humedad relativa en el sector de la entrada está regulado por las variaciones de la temperatura en dicho sector y la dirección del aire, es decir, si el aire entra o sale de la cueva.

Las estaciones de Laminosin y Herensugea son las más afectadas por los grupos de visitas, por la concentración de CO<sub>2</sub>. La sala entrada no presenta grandes concentraciones por su posición espacial respecto a la entrada de la cueva, que presenta además grandes proporciones, y el grado de inclinación hacia el interior.

La estación Laminosin presenta la mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la cueva, de los sectores en que se realizan las mediciones, principalmente en el periodo de verano, cuando son más numerosas las visitas y el nivel del agua es mínimo o están secos los lagos.

Se comprobó, tanto en el comportamiento de la temperatura como en la concentración de CO<sub>2</sub> una comunicación entre la zona inferior de Entrada y la porción posterior de Herensugea, generando una ligera circulación en tubo de viento entre ambas salas, predominando en la cueva la circulación en saco de aire.

La variable crítica para regular los grupos de visitantes en la cueva será el CO<sub>2</sub>, aunque se debe seguir monitoreando el comportamiento del resto de las variables por su importancia en la dirección de los procesos y para la determinación de un modelo de predicción de la dirección de los procesos.

Atendiendo a que la cueva comenzó a explotarse prácticamente con el inicio de las mediciones, se puede afirmar que se encuentra en un periodo de acomodamiento de las cargas externas que recibe. El desplazamiento del equilibrio de los procesos comienza y no ha estabilizado, en parte por un régimen de visitas dosificado para un mínimo impacto, como por el poco tiempo transcurrido que no ha logrado la ruptura de la inercia de la atmósfera. Para una caracterización más cercana a la realidad se necesitan, al menos, cinco años de colecta de datos.

Las recomendaciones se dirigieron a mantener el régimen de visitas, para determinar la influencia de la masa humana sobre los parámetros ambientales de la cueva, agregando una estación en la entrada de la sala del Guerrero, con los siguientes objetivos:

- Determinar las afectaciones que provocan en esta sala los grupos de visitantes
- Determinar la relación entre las variables ambientales de la sala del Guerrero y las de Herensugea.

Se colocó, a partir del mes de julio de 2007 un anemómetro de ultrasonidos para determinar la velocidad y dirección del aire en la galería de Acceso, lugar donde son sensibles las corrientes de aire en la cueva, mediciones que contribuirán a elaborar y calibrar el modelo de intercambio de masa y energía entre el interior y el exterior de la cavidad, fundamentalmente entre las isozonas y la sala Entrada.

En el presente trabajo se insiste en la comparación entre los resultados estadísticos del primer periodo de mediciones, año 2006, con el periodo actual, año 2007, además de continuar con el análisis estadístico general de los dos años de estudios.

## **2. Materiales y Métodos.**

Para el estudio del microclima de la cavidad se colocaron cuatro estaciones climáticas, tres en el interior de la cueva y una en el exterior, junto al edificio, compuestas por datalogers Opus 200 y sondas de alta precisión. En todas las estaciones se miden temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y concentración de CO<sub>2</sub>. Se agregó, a partir de julio de 2007, un anemómetro ultrasónico para la determinación de la

velocidad y dirección del aire en la galería de Acceso. En la Tabla I se muestran las variables medidas por estaciones.

| Estación              | T | Hr | P | CO <sub>2</sub> | T <sub>a</sub> | T <sub>r</sub> | Pluvio | V <sub>a</sub> |
|-----------------------|---|----|---|-----------------|----------------|----------------|--------|----------------|
| Exterior              | X | X  | X | X               |                |                | X      |                |
| Entrada               | X | X  | X | X               |                |                |        |                |
| Galería de Acceso     |   |    |   |                 |                |                |        | X              |
| Lagos (Laminosin)     | X | X  | X | X               | X              | X              | X      |                |
| Guerrero (Herensugea) | X | X  | X | X               |                |                |        |                |

*Tabla 1. Variables monitoreadas en las diferentes estaciones de la cueva y el exterior. T: Temperatura del aire en ° C, Hr: Humedad relativa en %, P: Presión atmosférica en hPa, CO<sub>2</sub> en ppm, T<sub>a</sub>: Temperatura del agua en ° C y T<sub>r</sub>: Temperatura de la roca en ° C, Pluvio: Goteo en la estación interior, lluvias en la estación del exterior en litros /m<sup>2</sup> y V<sub>a</sub>: Velocidad del aire en km/h.*

La monitorización está programada para un régimen de medición horario durante las 24 horas del día, a lo largo de todo el año. El número de visitas diarias así como el horario de entrada fue recopilado por los guías de la cueva.

Partiendo de los datos obtenidos, y con cinco años de datos, se confeccionarán las series temporales de cada una de las variables, para conocer su comportamiento en el tiempo, realizándose comparaciones en el comportamiento entre los diferentes parámetros medidos.

Como complemento necesario se calcularán algunos índices estadísticos como el promedio anual, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos y el rango de variación de cada parámetro medido.

La confección de matrices de correlación permitirá determinar la influencia entre los diferentes parámetros medidos y su ubicación en la cueva.

Para los cálculos termodinámicos se utiliza el algoritmo Clima (Otero 1990,1992), determinándose los valores de: humedad absoluta o específica, presión saturante de vapor, presión de vapor, temperatura de rocío, temperatura equivalente, temperatura virtual, temperatura potencial, entalpía, entropía, trabajo de expansión, calor cedido o absorbido por el sistema, densidad del aire y la presión parcial de CO<sub>2</sub>.

A partir del balance de masa y energía realizado se determinarán los mecanismos de transferencia que tienen lugar en la cueva, donde el balance de entalpía y entropía y el estudio del gradiente de la densidad serán fundamentales para la determinación de la dirección de los procesos.



*Figura 1. Localización de las estaciones de mediciones en la cueva y en el exterior. La estación Edificio está ubicada fuera de escala.*

### 3. Discusión de los resultados.

Cada año el clima presenta características propias del momento, comportamiento típico de los periodos de transición. El clima general de la Tierra está transitando desde el último glaciario hacia un periodo más calido, conocido por interglaciario, donde cambian las características térmicas e hídricas en las diferentes regiones del planeta.

Los amplios rangos de variación de los parámetros meteorológicos son algunas de las pruebas de este fenómeno global, en el que la acción del hombre es un catalizador que acelera el proceso de calentamiento, favoreciendo la inestabilidad de la masa atmosférica, con comportamientos anómalos de la temperatura y las lluvias.

Todos estos fenómenos repercuten sobre el microclima de las cuevas. En el caso de las cavernas que son utilizadas con fines turísticos, este proceso se acentúa, provocando un desequilibrio en la masa gaseosa de los diferentes sectores.

Otro de los efectos que se generan por este fenómeno es la variabilidad del régimen de lluvias, con respuestas en la cueva que modifican el régimen térmico y el equilibrio de la concentración del CO<sub>2</sub> por la acumulación del líquido en los lagos y gours.

El elevado promedio de humedad relativa, con un rango de variación que supera a la media, favorece la ruptura brusca del equilibrio del vapor de agua contenido en la atmósfera, entre la zona saturada en el interior de la cueva y el exterior, principalmente en horas de la tarde, cuando este parámetro alcanza sus valores mínimos en días secos.

|                    | T     | Hr     | P      | CO2    |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|
| Promedio           | 10,75 | 84,45  | 930,44 | 446,21 |
| Desv Std           | 6,58  | 17,75  | 6,07   | 20,07  |
| Coef. de Variación | 0,61  | 0,21   | 0,01   | 0,04   |
| Mínimo             | -7,70 | 10,90  | 906,90 | 315,90 |
| Máximo             | 33,20 | 100,00 | 948,90 | 520,10 |
| Rango              | 40,90 | 89,10  | 42,00  | 204,20 |

**Tabla II. Promedio de las variables medidas en el periodo 2006 – 2007 en la estación Edificio (exterior).**

El promedio de la temperatura disminuye desde el exterior hasta la estación Entrada. Posteriormente incrementa su valor, estabilizando entre 8,50 y 8,70 °C. La humedad relativa mantiene un incremento en la misma dirección, manteniendo un estado de saturación constante en las estaciones interiores (tablas de la II a la V).

La temperatura y la humedad relativa disminuyen su rango de variación desde el exterior hacia las estaciones más profundas. La presión atmosférica mantiene en todas las estaciones una variación similar. Solo la concentración de CO<sub>2</sub> incrementa el rango de variación, llegando sus valores máximos en el sector Laminosin.

|                    | T     | Hr     | P      | CO2     |
|--------------------|-------|--------|--------|---------|
| Promedio           | 7,83  | 98,88  | 928,90 | 481,95  |
| Desv Std           | 3,52  | 3,32   | 6,14   | 99,75   |
| Coef. de Variación | 0,45  | 0,03   | 0,01   | 0,21    |
| Mínimo             | -3,90 | 39,80  | 905,00 | 414,00  |
| Máximo             | 15,40 | 100,00 | 948,00 | 1554,00 |
| Ranmo              | 19,30 | 60,20  | 43,00  | 1140,00 |

**Tabla III. Promedio de las variables medidas en el periodo 2006 – 2007 en la estación Entrada.**

|                    | T    | Hr     | P      | CO2     | Troca | T Agua |
|--------------------|------|--------|--------|---------|-------|--------|
| Promedio           | 8,69 | 100,00 | 932,52 | 758,19  | 8,78  | 7,59   |
| Desv Std           | 0,16 | 0,00   | 6,16   | 371,95  | 0,09  | 1,25   |
| Coef. de Variación | 0,02 | 0,00   | 0,01   | 0,49    | 0,01  | 0,16   |
| Mínimo             | 8,20 | 100,00 | 909,20 | 317,60  | 8,60  | 5,70   |
| Máximo             | 9,20 | 100,00 | 951,60 | 2342,60 | 8,90  | 9,10   |
| Rango              | 1,00 | 0,00   | 42,40  | 2025,00 | 0,30  | 3,40   |

**Tabla IV. Promedio de las variables medidas en el periodo 2006 – 2007 en la estación Laminosin.**

|                    | T    | Hr     | P      | CO2     |
|--------------------|------|--------|--------|---------|
| Promedio           | 8,58 | 100,00 | 933,05 | 632,20  |
| Desv Std           | 0,23 | 0,07   | 6,16   | 212,72  |
| Coef. de Variación | 0,03 | 0,00   | 0,01   | 0,34    |
| Mínimo             | 8,00 | 98,70  | 909,70 | 314,90  |
| Máximo             | 8,90 | 100,00 | 952,10 | 1729,50 |
| Rango              | 0,90 | 1,30   | 42,40  | 1414,60 |

*Tabla V. Promedio de las variables medidas en el periodo 2006 – 2007 en la estación Herensugea.*

El comportamiento general del año 2007, comparándolo con el 2006, se puede describir como un año más frío, más húmedo y con una mayor estabilidad en la concentración de CO<sub>2</sub>, con un valor promedio algo superior de este último parámetro, como se aprecia en las tablas VI y VII.

|                    | T     | Hr     | P      | CO2    |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|
| Promedio           | 11,46 | 81,75  | 929,90 | 437,43 |
| Desv Std           | 6,89  | 18,41  | 6,29   | 22,76  |
| Coef. de Variación | 0,60  | 0,23   | 0,01   | 0,05   |
| Mínimo             | -6,40 | 10,90  | 906,90 | 315,90 |
| Máximo             | 33,20 | 100,00 | 947,50 | 520,10 |
| Rango              | 39,60 | 89,10  | 40,60  | 204,20 |

*Tabla VI. Estadística sumaria de la estación Edificio (exterior) durante el año 2006.*

|                    | T     | Hr     | P      | CO2    |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|
| Promedio           | 10,06 | 87,07  | 930,97 | 454,67 |
| Desv Std           | 6,18  | 16,69  | 5,81   | 12,06  |
| Coef. de Variación | 0,61  | 0,19   | 0,01   | 0,03   |
| Mínimo             | -7,70 | 16,40  | 911,30 | 417,40 |
| Máximo             | 32,90 | 100,00 | 948,90 | 507,80 |
| Rango              | 40,60 | 83,60  | 37,60  | 90,40  |

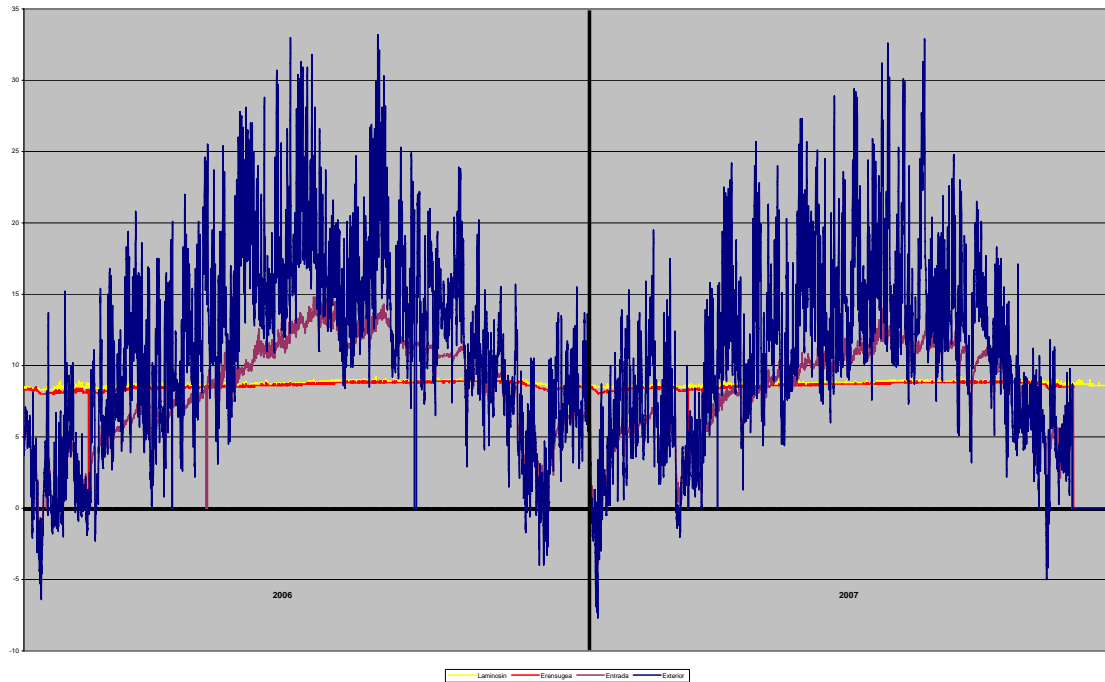
*Tabla VII. Estadística sumaria de la estación Entrada durante el año 2006.*

### **3.1. Temperatura.**

La temperatura en el sistema exterior y en la sala de la Entrada, mantienen dos ciclos más o menos sinusoidales, el ciclo diurno y el anual. Ambos dependen del comportamiento del clima general del planeta.

Aunque ambos ciclos se aprecian amortiguados en el sector de la Entrada, son las variaciones diarias las que más reducen su recorrido (fig. 2). Aunque la sala se ilumina naturalmente, los rayos del sol no inciden directamente sobre el antro, transmitiéndose el calor a través de las corrientes convectivas que se generan entre ambos sistemas. El

papel refrigerante de la roca es fundamental en el proceso de enfriamiento del aire que entra, a pesar del amplio volumen de la sala.



**Figura 2.** Comportamiento de la temperatura en la cueva Mendukilo en el periodo 2006 – 2007.

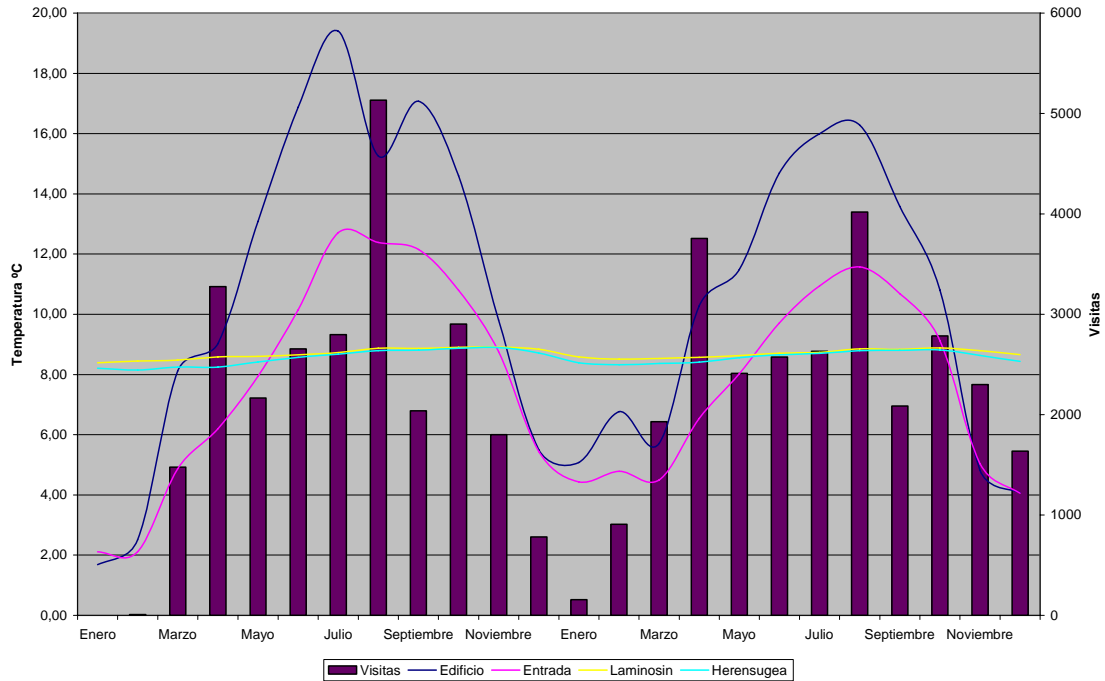
El año 2007 ha tenido un comportamiento más extremo que el 2006, con un rango de temperatura mayor, aunque el promedio anual ha decrecido en cerca de 1,4 °C en el exterior y en la Entrada cerca de 0,68 °C. En la zona interior se mantuvo casi inalterada (tabla VIII), con un muy ligero descenso en Laminosin.

|            | 2006  | 2007  |
|------------|-------|-------|
| Edificio   | 11,46 | 10,06 |
| Entrada    | 8,18  | 7,50  |
| Laminosin  | 8,70  | 8,69  |
| Herensugea | 8,58  | 8,58  |

**Tabla VIII.** Promedio de temperaturas anuales en las diferentes estaciones.

La cueva mantiene su inercia a las respuestas de las variaciones térmicas de la atmósfera epigea, con un desplazamiento de la curva apreciable incluso en el gráfico de los promedios mensuales, principalmente en las curvas de los valores máximos. Las temperaturas máximas tienen lugar entre los meses de julio y septiembre en el sistema exterior. Ya en la sala Entrada se aprecia un ligero desplazamiento en la curva, inercia provocada por varios factores como las dimensiones de la sala y por ser la zona de intercambio con el interior de la cavidad.

Las estaciones hipogeas manifiestan un desplazamiento más acentuado en la curva de la temperatura anual, apareciendo los valores máximos entre los meses de octubre y noviembre (figuras 2 y 3). Ésta anomalía puede ser originada por dos causas: la morfología de la cueva y el efecto acumulativo del calor.



**Figura 3. Comportamiento de los promedios mensuales de temperatura en todas las estaciones.**

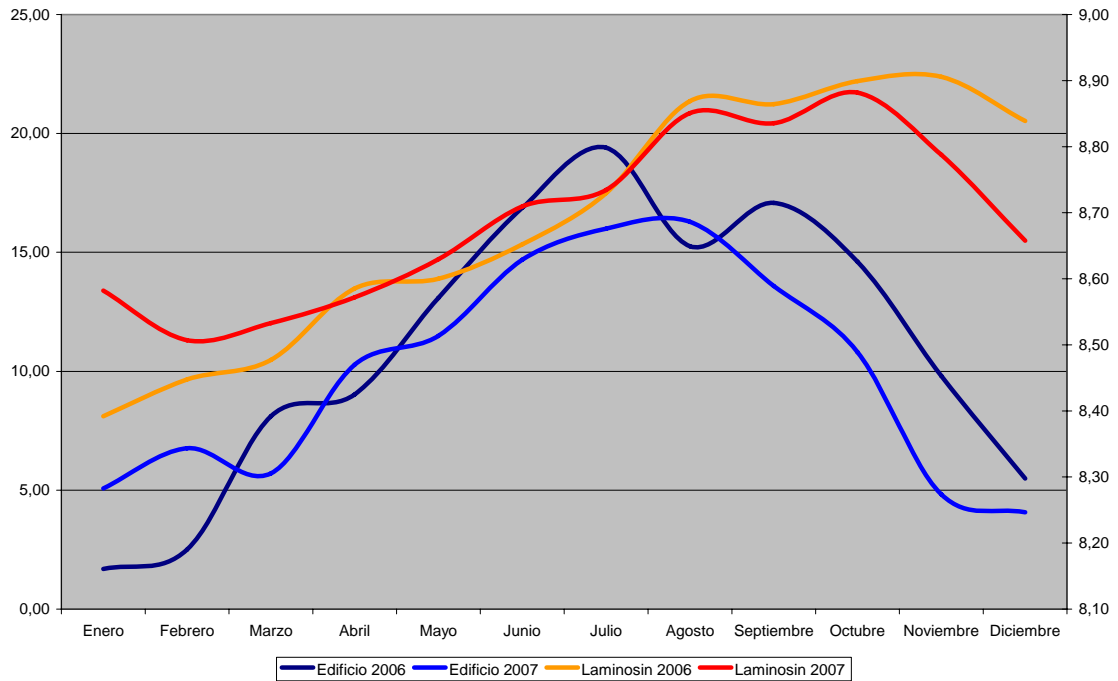
La morfología de la cueva juega un papel muy importante en la distribución térmica. En el sector Laminosin, donde finaliza el recorrido de las pasarelas, continúa una galería algo más baja, donde generalmente se forma un lago de pequeñas dimensiones, pero con el suficiente volumen para influenciar sobre la atmósfera del lugar. Luego abre otra sala, ligeramente ascendente, con mayor volumen que la primera sala propiamente dicha.

La circulación del aire es en saco de aire en este sector y su comportamiento va a depender de la cantidad de agua contenida en los lagos. Generalmente, en el verano y otoño, el nivel de los lagos desciende, hasta quedar prácticamente secos, como sucedió en esa temporada del 2006.

En la figura 4 se aprecia el comportamiento entre la estación Laminosin y la de Edificio, manifestándose el desplazamiento en los valores máximos de la masa gaseosa hipogea respecto a la epigea. El comportamiento de las curvas en el 2006 presenta una cierta relación, aunque con un ligero desplazamiento en la representación del aire interior. Este fenómeno manifiesta la influencia de morfología en el retardo, por el tiempo que tarda la circulación en la zona más profunda del sector de los lagos.

Un fenómeno que se pone de manifiesto en la curva de la temperatura hipogea es un ligero incremento en los meses de octubre y noviembre. Este incremento no responde propiamente a la inercia provocada por la morfología de la cueva, está causado directamente por el efecto acumulativo de calor, generado por los grupos de visitantes.

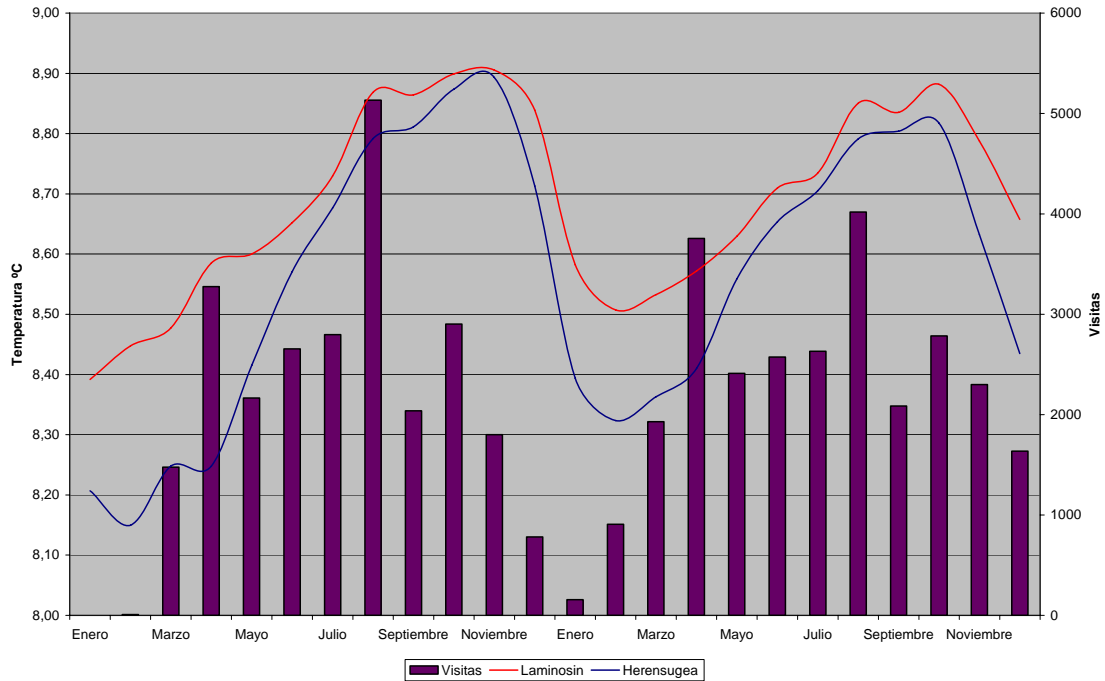
Aquí se produce un efecto de feed back entre el efecto acumulativo y la circulación del aire. Como se aprecia en la figura 4, el valor máximo de la temperatura en el 2006 tuvo lugar en el mes de julio en el exterior. En agosto hubo un descenso, incrementando el valor en septiembre, con un posterior descenso a partir de octubre.



**Figura 4. Comportamiento el promedio mensual de la temperatura en las estaciones Edificio y Laminosin. En el eje de las ordenadas de la izquierda, se representan la temperatura exterior.**

En la estación Laminosin el comportamiento fue similar, con la salvedad que el segundo incremento de la temperatura fue superior al primero, es decir, en el exterior el valor máximo tuvo lugar en julio, con un máximo secundario en septiembre. En Laminosin el valor máximo promedio fue en noviembre, que correspondería a septiembre en el exterior, y el máximo secundario ocurrió en agosto.

En el 2007 el comportamiento fue similar en cuanto a causa y efecto, aun cuando el promedio máximo de temperatura en el exterior fue en agosto, mientras que el interior de la cueva tuvo lugar en octubre, con un máximo secundario en septiembre (figura 4).



**Figura 5. Comportamiento del promedio mensual de la temperatura en las estaciones Laminosin y Herensugea y su relación con las visitas realizadas a la cueva.**

Un comportamiento muy similar tiene lugar en el sector Herensugea. Este sector difiere de Laminosin en los rangos de variación, que son superiores. En Herensugea todos los valores promedios de la temperatura son inferiores a los del sector Laminosin. Esto pudiera ser explicado por dos causas:

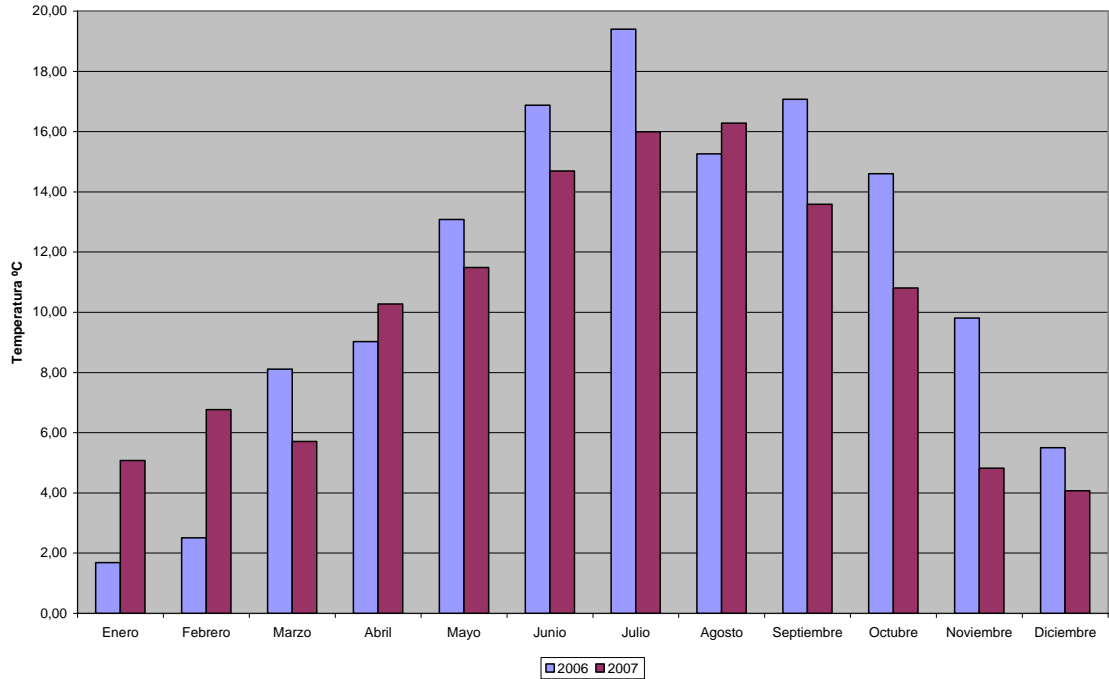
- Una comunicación con la sala de Entrada. Esta variante se comenta en la interpretación de los resultados del año 2006 (Otero *et. al.* 2007) y explica de forma satisfactoria muchas de las anomalías detectadas en esta zona de la cueva.
- Una comunicación con el exterior. Esta variante nos fue comentada por Carlos Acáz, quien nos comunicó la posibilidad de conexión atendiendo a la morfología de la zona final de la sala del Guerrero y su coincidencia con una dolina en el exterior, siendo la zona de menor espesor de roca sobre el techo de la cueva.



**Figura 6.** Ubicación de la zona de la posible comunicación del sector Guerrero con el exterior, según comunicación personal de Carlos Acáz.

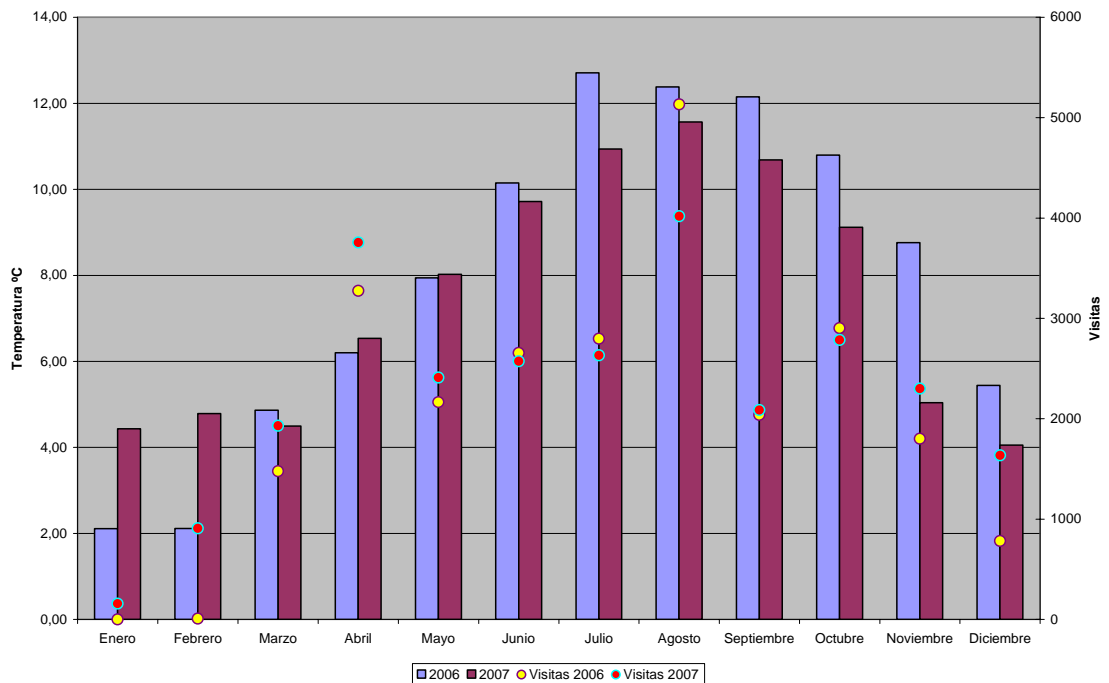
No se descarta una conexión con el exterior por la zona antes mencionada. En el sector de referencia no se aprecian efectos morfológicos que avalen la anterior afirmación. De existir un conducto que comunique con la atmósfera epigea, este será del orden de las grietas, siendo lo suficientemente estrecho como para no generar, prácticamente ningún tipo de intercambio de masa y energía entre ambos sistemas.

De generarse un intercambio de masa y energía entre ambos sistemas en el sector de referencia, se produciría una reducción del contenido húmedo del aire en el periodo seco, aunque en el periodo húmedo se forman duchas. La variación del contenido húmedo del aire, unido a una mayor variación de la temperatura en forma localizada, daría un efecto de corrosión en las formaciones secundarias, morfología no observada en ese sector, donde los espeleotemas presentan una terminación cristalina, propia de un microclima muy estable.



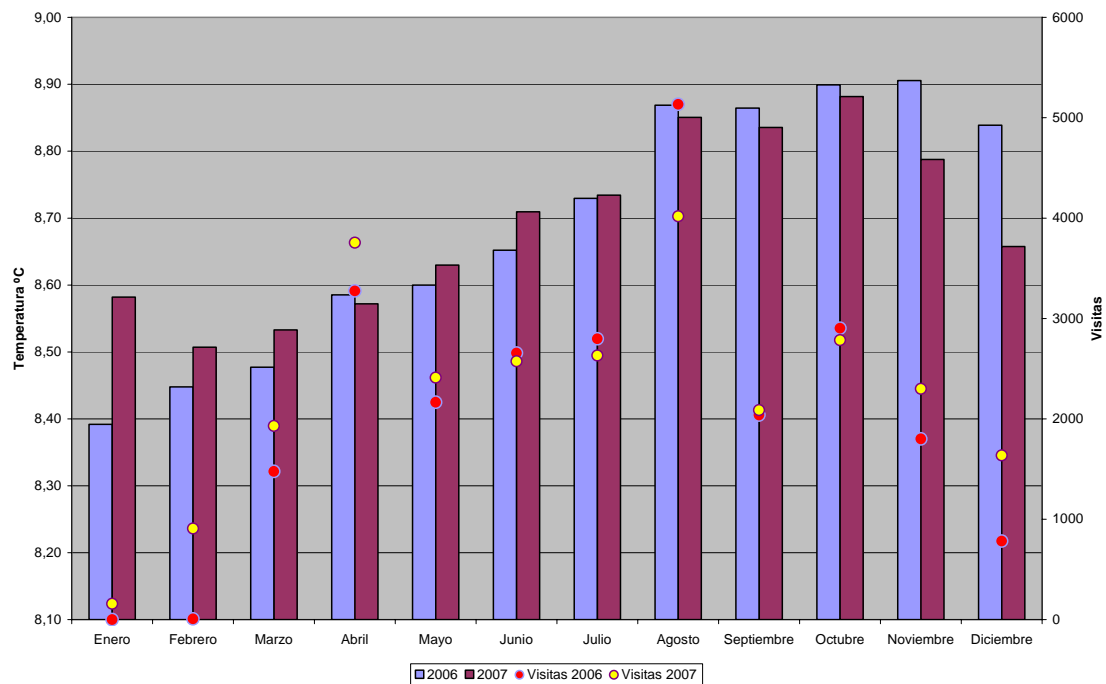
**Figura 7. Comportamiento del promedio mensual de la temperatura en 2006 y 2007 en la estación Edificio.**

Comparando el comportamiento de la temperatura en los dos años estudiados, se aprecia que, a pesar de ser el 2006 un periodo más cálido, las temperaturas en los meses de enero, febrero, abril y agosto del 2007 fueron más elevadas (figura 7).



**Figura 8. Comportamiento del promedio mensual de la temperatura en 2006 y 2007 en la estación Entrada.**

La misma relación, pero en la estación Entrada, sólo coincide con el exterior en los meses de enero, febrero, abril y mayo, este último mes con una diferencia de solo 0,09 °C. En el resto de los meses prevalece una importante diferencia (figura 8).



**Figura 9. Comportamiento del promedio mensual de la temperatura en 2006 y 2007 en la estación Laminosin.**

Resulta interesante la diferencia del comportamiento de la temperatura de ambos años en las estaciones interiores. En Laminosin este parámetro fue superior entre los meses de enero a julio (figura 9) con la excepción de abril, a diferencia de Herensugea, donde se manifiesta una diferencia apreciable los siete primeros meses del año, mientras que en agosto los valores promedios son iguales (figura 10). Como se mencionó antes, las temperaturas en Herensugea son inferiores a Laminosin durante todo el periodo de mediciones.

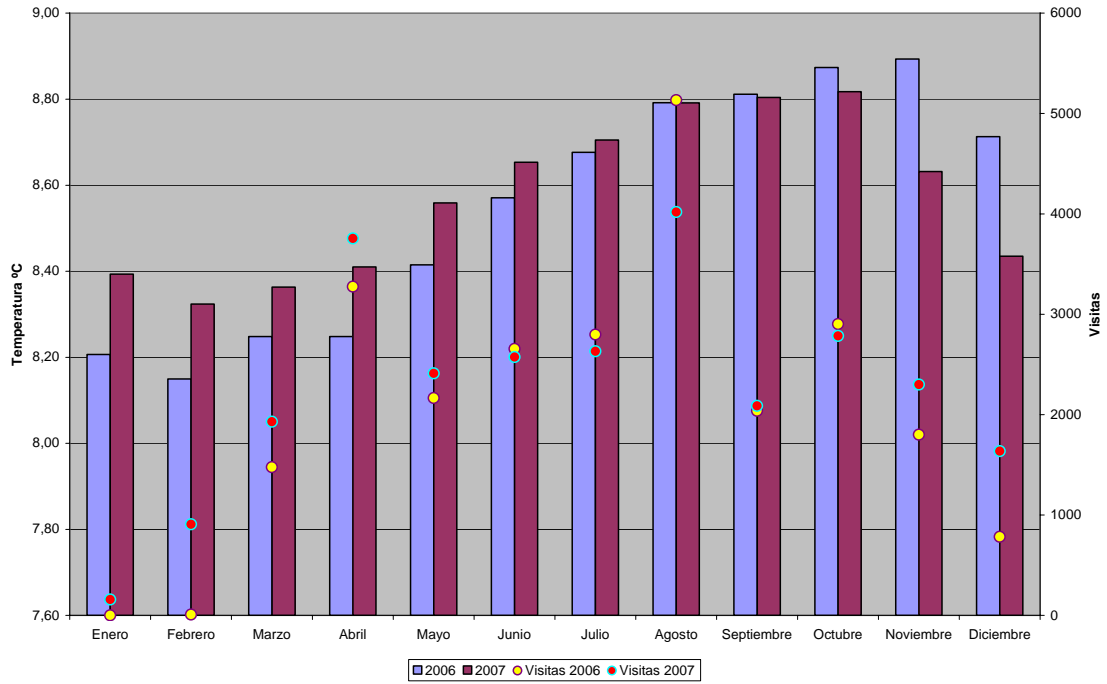


Figura 10. Comportamiento del promedio mensual de la temperatura en 2006 y 2007 en la estación Herensugea.

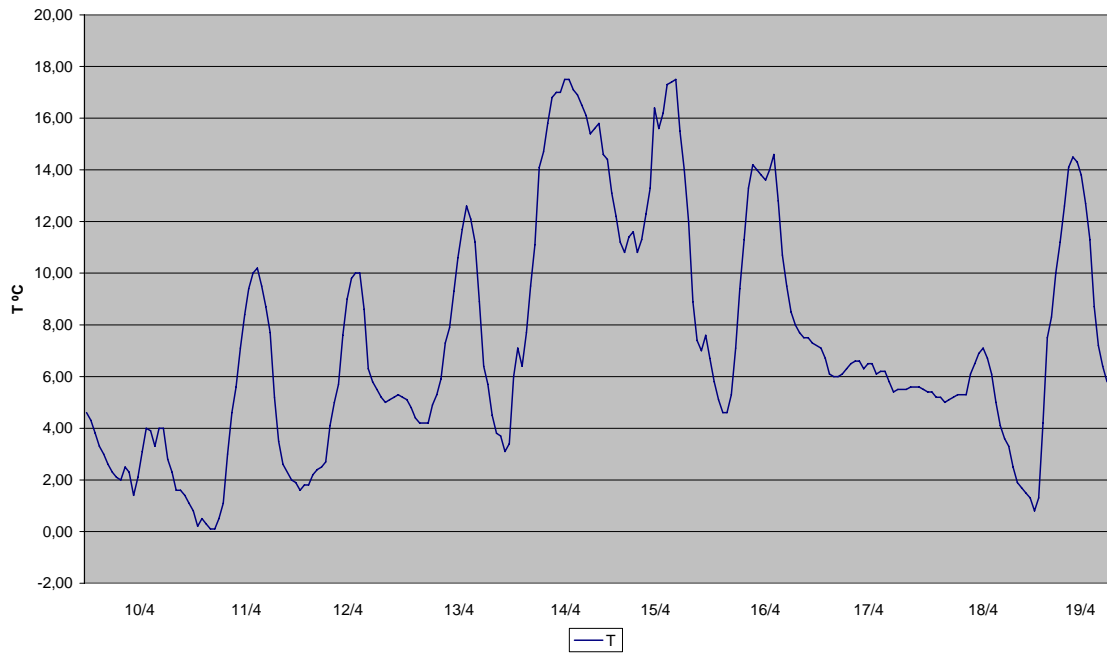
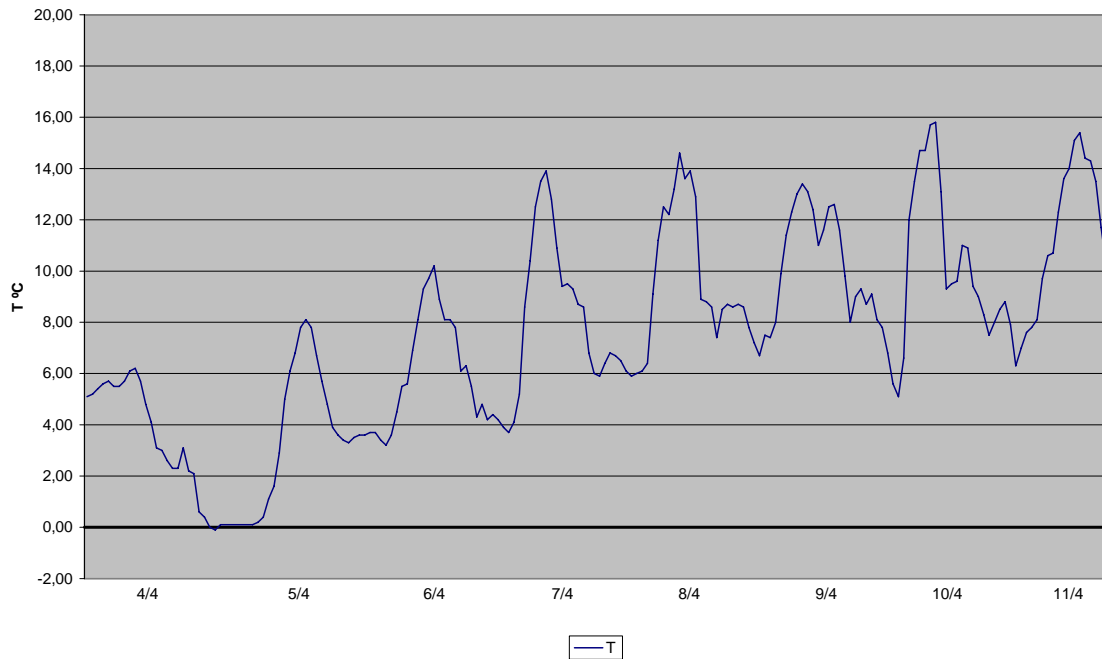


Figura 11. Comportamiento de la temperatura en el exterior durante Semana Santa de 2006.



**Figura 12. Comportamiento de la temperatura en el exterior durante Semana Santa de 2007.**

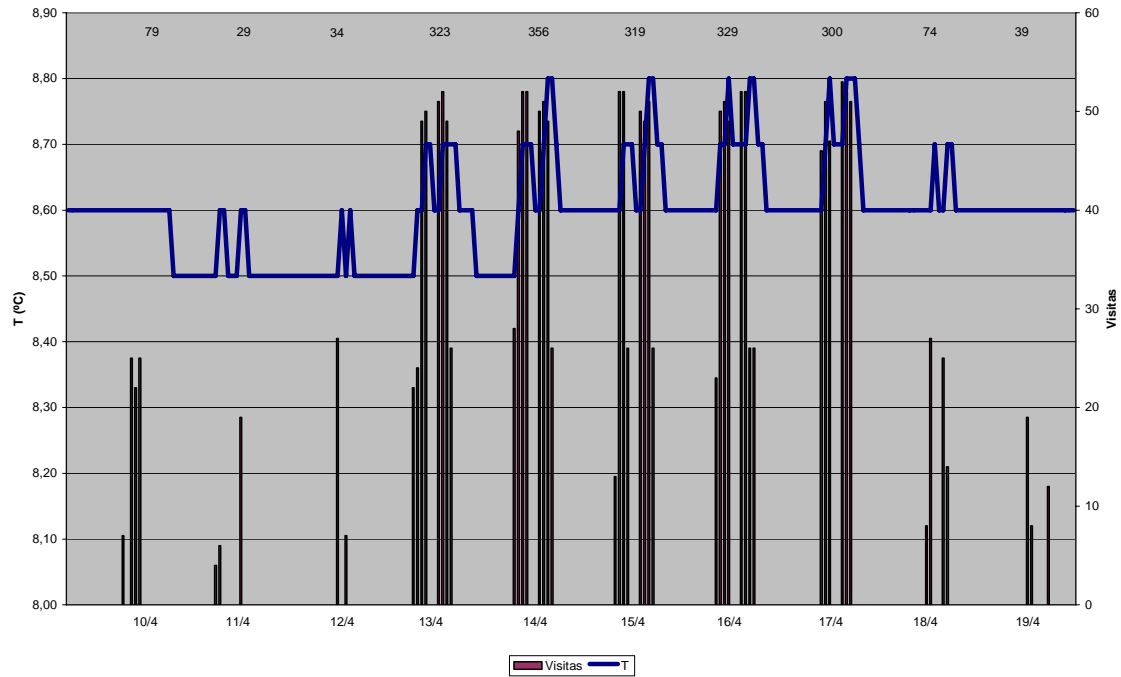
Los periodos de Semana Santa son propicios para el estudio de la respuesta térmica de la cueva ante las visitas. Los primeros meses de año se caracterizan por una baja cantidad de visitantes, refrescándose la cueva por las bajas temperaturas del invierno.

Se aprecia mejor el efecto acumulativo de calor a corto plazo, principalmente cuando es posible comparar entre diferentes periodos.

Aunque en un trabajo anterior se demuestra una baja influencia del sistema exterior sobre la atmósfera hipogea (Otero *et. al.* 2006), el comportamiento de la masa gaseosa epigea va a favorecer o limitar el intercambio de masa y energía.

Durante la Semana Santa del año 2006, la atmósfera exterior tuvo un comportamiento algo disperso, principalmente atendiendo al recorrido diario de la temperatura, con cambios bruscos en los valores mínimos y máximos diarios, perdiéndose en algunos momentos la diferencia térmica entre el día y la noche (figura 11).

En la Semana Santa del año 2007 se aprecia un recorrido típico de la temperatura, con un comportamiento sinusoidal que caracteriza las diferencias entre los valores del día y la noche, aunque con cierta tendencia al calentamiento.

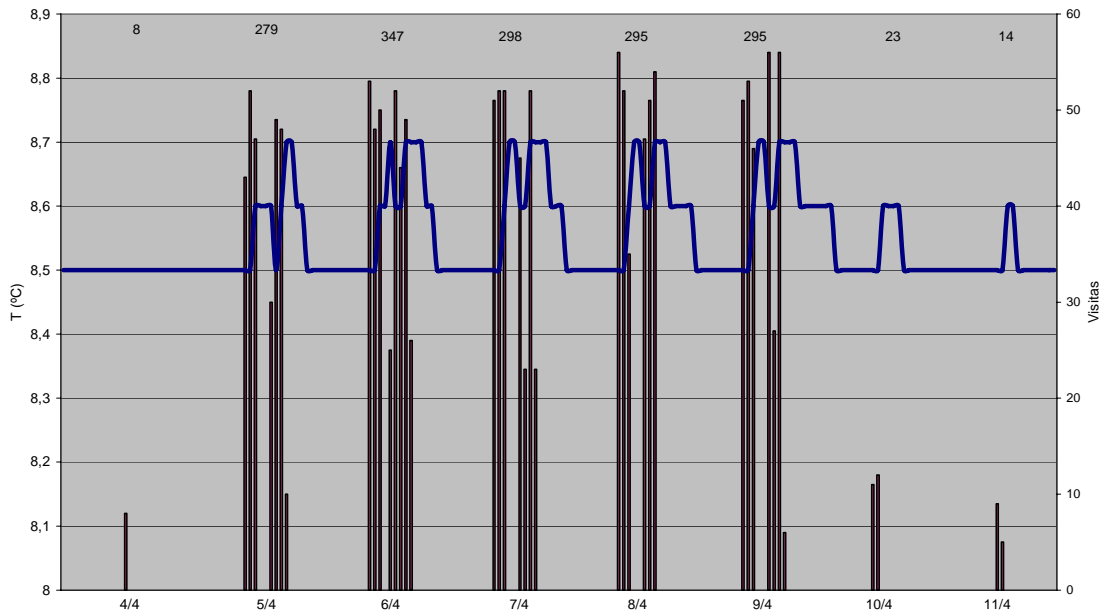


**Figura 13. Relación entre la temperatura y las visitas en Laminosin durante Semana Santa de 2006.**

En el interior de la cueva los valores máximos de temperatura están determinados por la cantidad de visitantes. En el periodo analizado del año 2006 se aprecia en las estaciones interiores un ligero incremento de los valores mínimos diarios, en ambos casos coinciden entre los días 14 y 15 de abril, justo cuando tiene lugar una mínima muy superior al resto de los días en el exterior.

El incremento máximo de la temperatura para un día tiene lugar en Laminosin precisamente el 14 de abril, coincidiendo con un máximo de visitas en el periodo, con 356 personas que entraron a la cueva en el horario establecido (figura 13).

En los días siguientes mantiene un comportamiento homogéneo, con incrementos de solo 0,2 °C, y una velocidad de recuperación similar en el sector Laminosin. En la sala Herensugea el comportamiento de la temperatura es algo diferente en relación al tiempo de recuperación.



**Figura 14. Relación entre la temperatura y las visitas en Laminosin durante Semana Santa de 2007.**

En la curva de la temperatura se aprecia un incremento de la duración del valor máximo a medida que pasan los días, llegando a ser de 21 horas (figura 14).

En el periodo de Semana Santa del año 2007, en Laminosin los valores de temperatura se mantuvieron en un rango entre 8,5 y 8,7 °C, es decir, alcanzaron un máximo 0,1 °C inferior al año anterior. El tiempo de recuperación fue aumentando con el paso de los días, apreciándose dos etapas en la segunda curva, un primer momento que se mantiene el valor máximo, cuyo periodo fue similar en los días de mayor afluencia de público, e otro momento en precisamente en la curva de descenso, donde presenta un escalón que incrementa su duración en los días siguientes (figura 14).

El comportamiento en Herensugea difiere de la estación anteriormente analizada en dos aspectos, la recuperación de la temperatura del aire solo se ve afectada por un incremento en la duración del valor máximo y que solo sufre un incremento de 0,1 °C (figura 16).

La diferencia del comportamiento de la curva de recuperación de la temperatura en ambas estaciones, está condicionado por la morfología de cada una de ellas y la distancia de la pasarela a las sondas de medición. En cambio, la velocidad del aumento y disminución de la temperatura, mantiene en ambas estaciones una pendiente muy similar, de 1 °C por hora, en algunos casos la recuperación tiene lugar en dos etapas con un escalón intermedio, que tiene una duración entre 1 y 2 horas en Laminosin, manteniéndose el valor máximo por un tiempo similar. En Herensugea no se aprecia dicho escalón, incrementando el tiempo que se mantiene el valor máximo, formando en muchos casos una meseta en la curva, con una duración de hasta 14 horas, recuperando luego su temperatura original en solo una hora (figuras 13 a la 16).

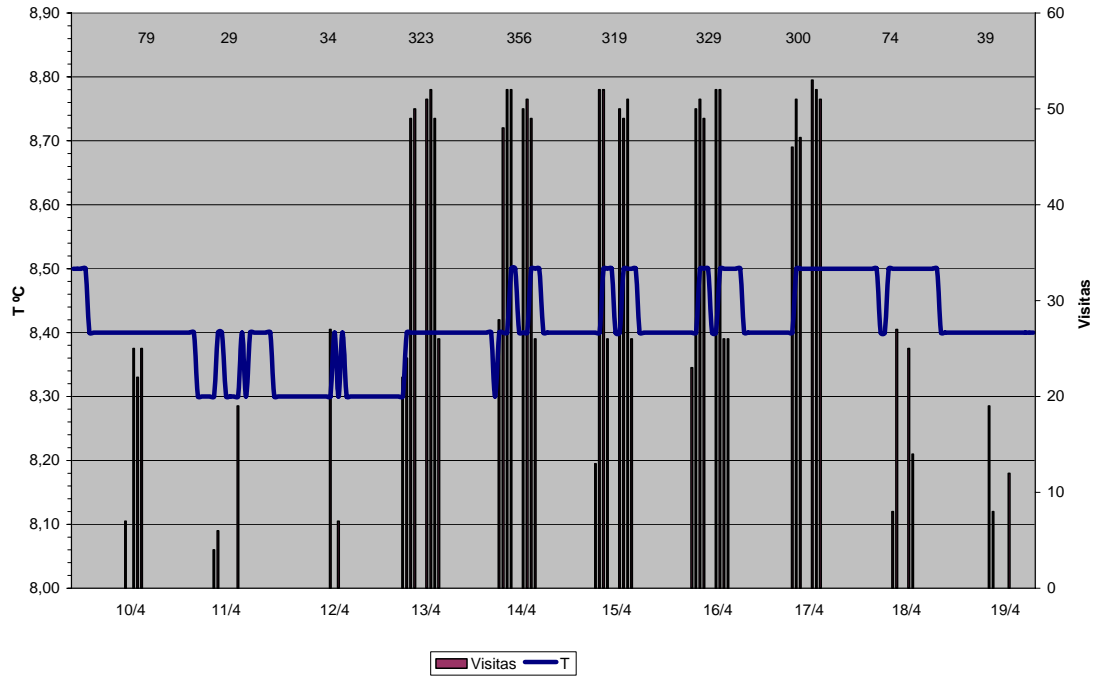


Figura 15. Relación entre la temperatura y las visitas en Herensugea durante Semana Santa de 2006.

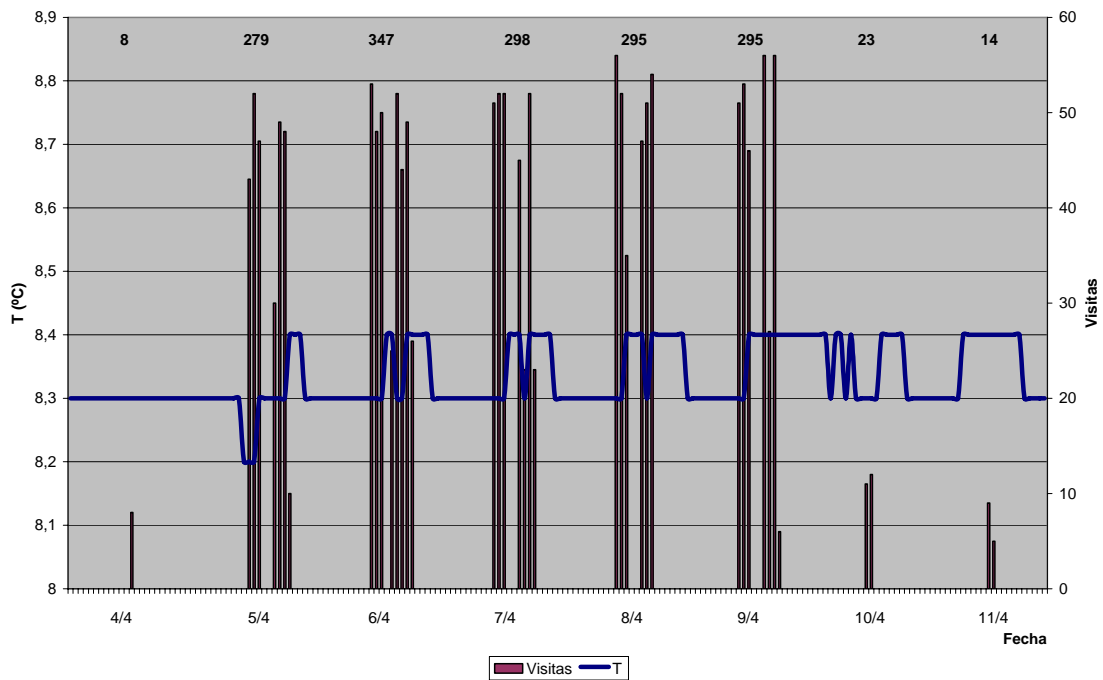
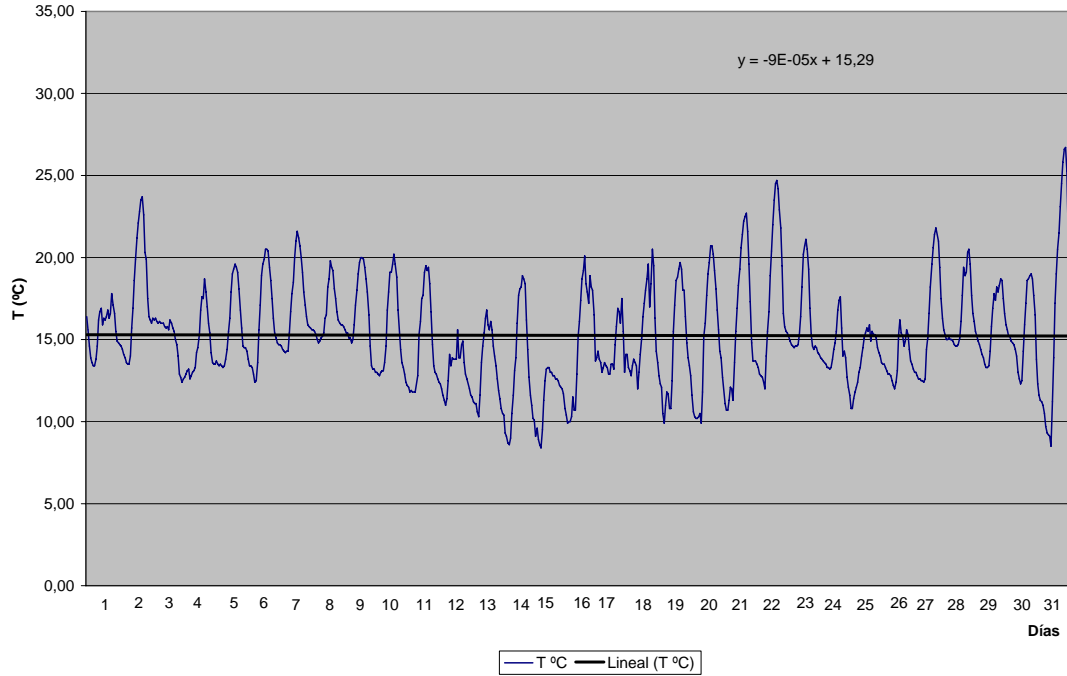


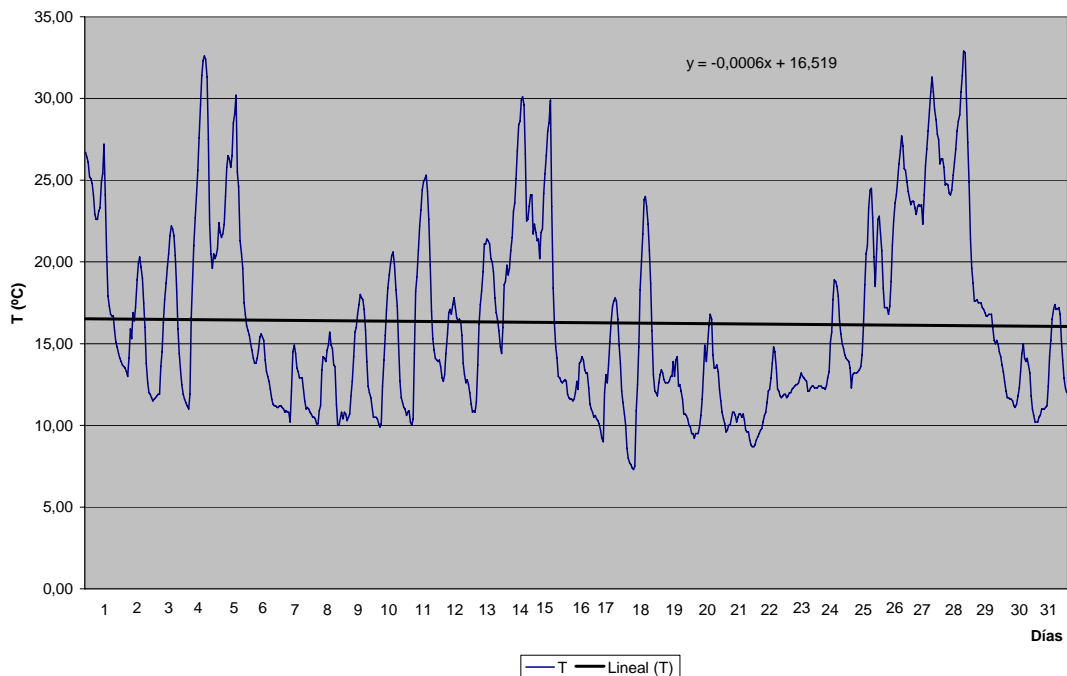
Figura 16. Relación entre la temperatura y las visitas en Herensugea durante Semana Santa de 2007.

El mes de agosto es el periodo de mayor afluencia de público a la cueva. En los años de explotación, que coinciden con los años de estudios, se ha mantenido esa relación, aunque el máximo diario le corresponde al mes de abril, específicamente en Semana Santa. Atendiendo a la frecuencia y cantidad de visitas, se decidió analizar ambos periodos para la determinar la influencia de la presencia humana sobre el efecto acumulativo de calor.

Durante el año 2006 el promedio de temperatura en el exterior del mes de agosto fue el tercero más elevado del año, presentando el valor máximo durante el 2007 (figura 4). En las estaciones interiores, en el 2006 la temperatura promedio máxima tuvo lugar en los meses de noviembre, mientras que en el 2007 fue el mes de octubre (figura 5).



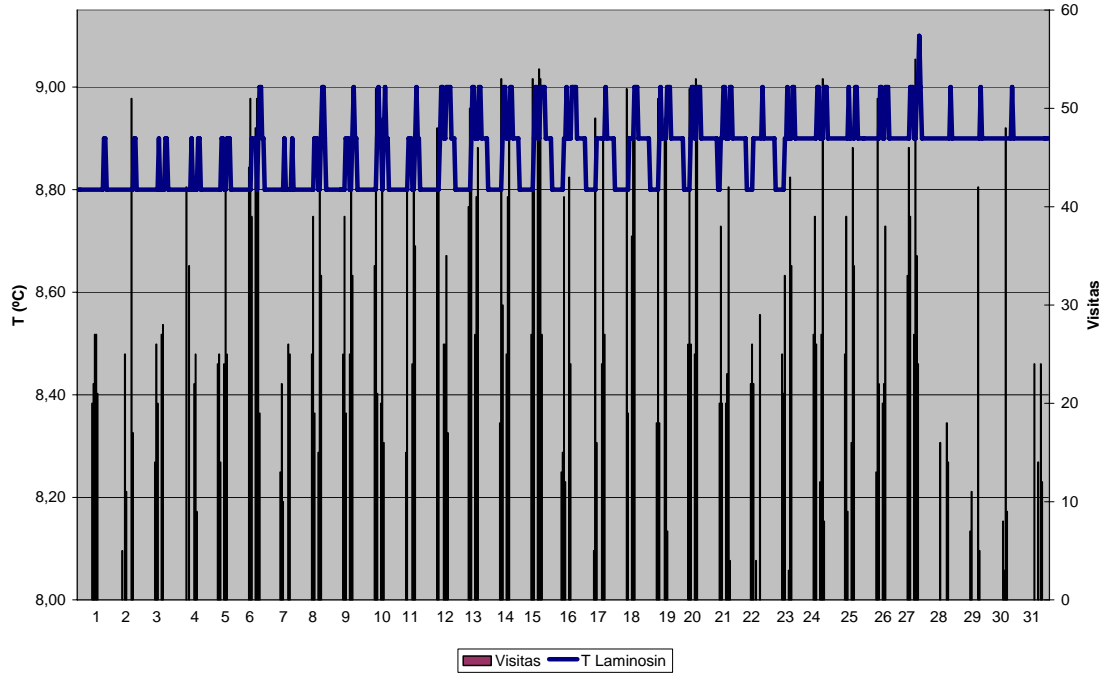
**Figura 17. Comportamiento de la temperatura en Edificio durante el mes de agosto de 2006.**



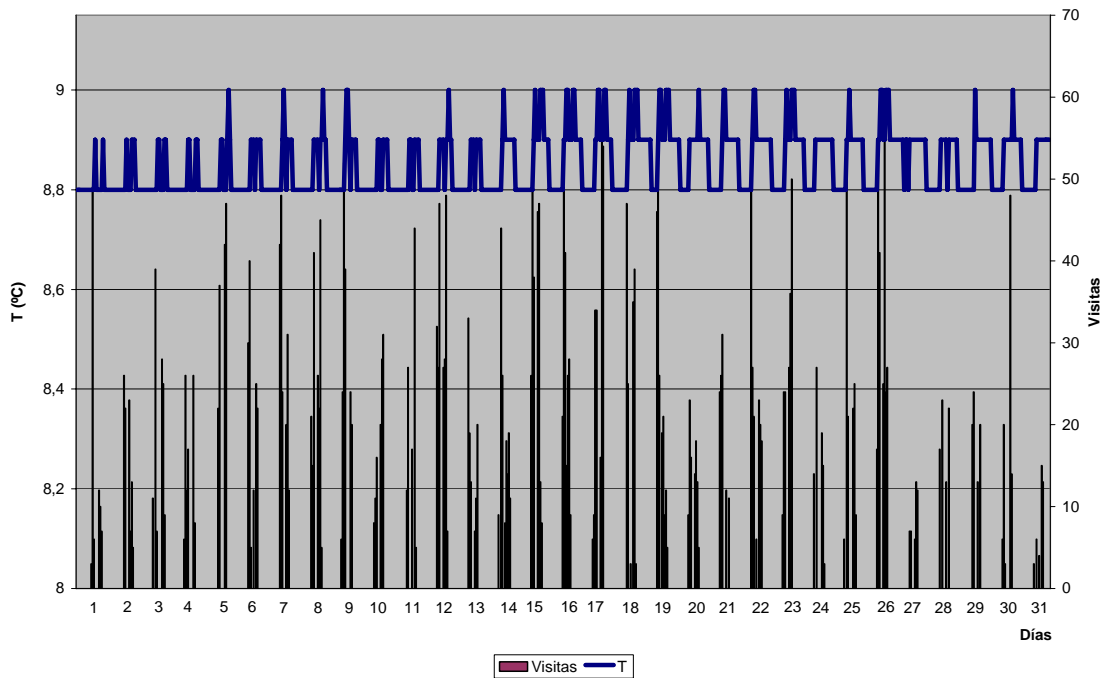
**Figura 18. Comportamiento de la temperatura en Edificio durante el mes de agosto de 2007.**

Comparando los meses de agosto de 2006 y 2007, se aprecia un comportamiento más homogéneo en el primer año. Dos ciclos pudieran ser definidos en el gráfico de la temperatura (figura 17), uno diario, clásico entre el día y la noche y el otro quincenal. En

el gráfico de la temperatura de agosto del 2007, se aprecian también dos ciclos, uno diario, menos organizado que el año anterior y el segundo con una duración aproximada de 10 días, con periodos de temperaturas predominantes superiores a los 20 °C y otros que predominan los valores inferiores a 15 °C (figura 18).

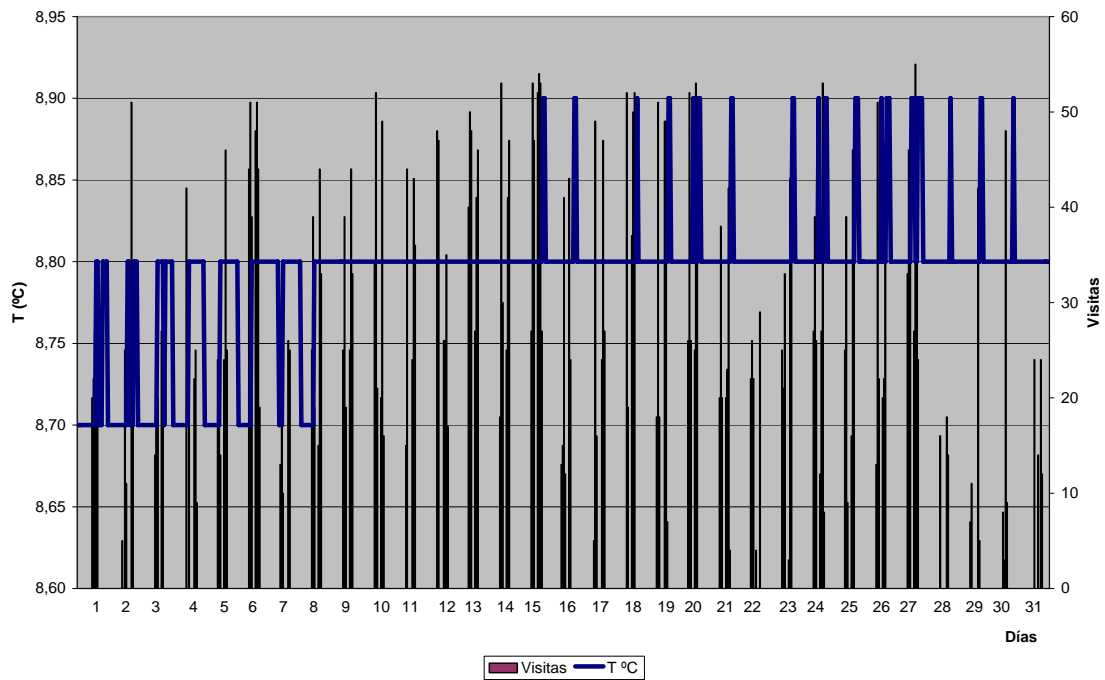


**Figura 19.** Relación entre la temperatura y las visitas en Laminosin durante el mes de agosto de 2006. El promedio diario de visitas fue de 165.

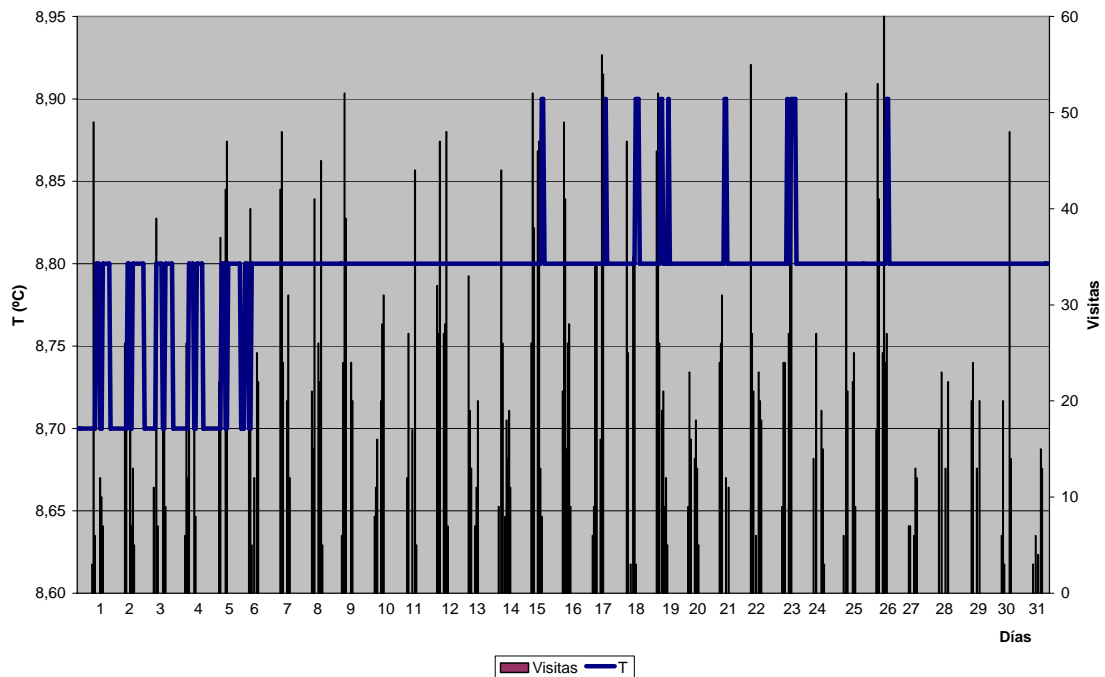


**Figura 20.** Relación entre la temperatura y las visitas en Laminosin durante el mes de agosto de 2007. El promedio diario de visitas fue de 129.

En las estaciones interiores se aprecia un ligero incremento de la temperatura, con una tendencia que disminuye de un año a otro, aunque los valores de temperatura son similares, moviéndose en el mismo rango (figuras 19, 20, 21 y 22).



**Figura 21.** Relación entre la temperatura y las visitas en Herensugea durante el mes de agosto de 2006. El promedio diario de visitas fue de 165.



**Figura 22.** Relación entre la temperatura y las visitas en Herensugea durante el mes de agosto de 2007. El promedio diario de visitas fue de 129.

En la estación Herensugea se registran valores constantes que no oscilan con el régimen de visitas, fundamentalmente en el año 2007, lo que hace pensar que la masa humana no

afecta de forma directa el efecto acumulativo de calor que favorece la inercia que desplaza la curva del interior de la cueva respecto al exterior.

Como un medio de comparar ambas variables, se tomaron las pendientes de las tendencias mensuales en las estaciones Laminosin y Edificio, correlacionándolas con el promedio diario de visitas de cada mes, determinando, a partir del coeficiente de correlación, una mayor interrelación entre las pendientes del interior y el exterior y casi nula con las visitas (tablas IX y X).

| Meses      | Laminosin | Exterior | Visitas |
|------------|-----------|----------|---------|
| Enero      |           |          |         |
| Febrero    | 5,0       | 13,0     | 0,3     |
| Marzo      | 2,0       | 137,0    | 47,6    |
| Abril      | -0,7      | -4,0     | 109,2   |
| Mayo       | 0,4       | 9,0      | 69,8    |
| Junio      | 1,0       | -17,0    | 88,5    |
| Julio      | 1,0       | 33,0     | 90,3    |
| Agosto     | 2,0       | -0,9     | 165,6   |
| Septiembre | -1,0      | -123,0   | 67,9    |
| Octubre    | 0,7       | 26,0     | 93,6    |
| Noviembre  | -0,1      | -19,0    | 60,0    |
| Diciembre  | -4,0      | -52,0    | 43,5    |
| Enero      | -1,0      | -131,0   | 5,1     |
| Febrero    | 0,3       | 75,0     | 32,4    |
| Marzo      | -0,6      | -105,0   | 62,3    |
| Abril      | 2,0       | 149,0    | 125,2   |
| Mayo       | 0,8       | 31,0     | 77,8    |
| Junio      | 0,2       | 5,0      | 85,8    |
| Julio      | 1,0       | 58,0     | 84,9    |
| Agosto     | 0,9       | -6,0     | 129,6   |
| Septiembre | 0,5       | -33,0    | 67,3    |
| Octubre    | 1,0       | -134,0   | 89,8    |
| Noviembre  | -4,0      | -71,0    | 76,7    |
| Diciembre  | -3,0      | -57,0    | 52,8    |

**Tabla IX. Comparación entre la pendiente de la tendencia de la temperatura en las estaciones Laminosin y Edificio con el promedio diario de visitas.**

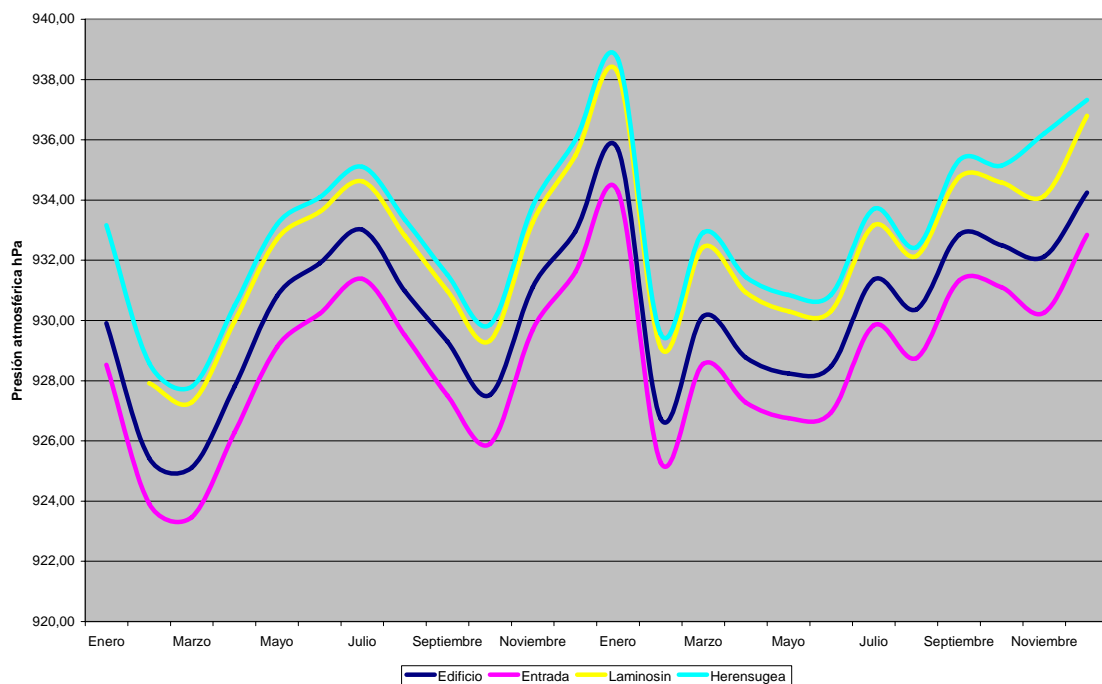
|                |                |                 |
|----------------|----------------|-----------------|
|                | Pendiente Lam. | Visitas diarias |
| Pendiente Ext. | 0,4889 (23,9)  | 0,2194          |
| Pendiente Lam. |                | 0,1501 (2,24)   |

**Tabla X. Matriz de correlación entre las estaciones Laminosin, Edificio y el promedio diario de visitas. Entre paréntesis el valor de  $r^2$ .**

En la tabla X se aprecia que, el promedio diario de las visitas solo explica alrededor del 2 % de la variabilidad de la pendiente de la tendencia de la curva de la temperatura en el interior de la cueva, mientras que las variaciones térmicas del exterior explican casi un 24 %. Atendiendo a los resultados antes expuestos en su conjunto, se concluye que, en el caso de la cueva Mendukilo, el régimen de visitas actual no influye sobre el efecto acumulativo de calor en la cueva, por lo que el régimen promedio de las temperaturas es prácticamente el natural.

### 3.2. Presión atmosférica.

La presión atmosférica es una de las variables que mantienen una buena correlación en todas las zonas de la cueva. La diferencia más notable entre las estaciones se debe a la diferencia de altura.



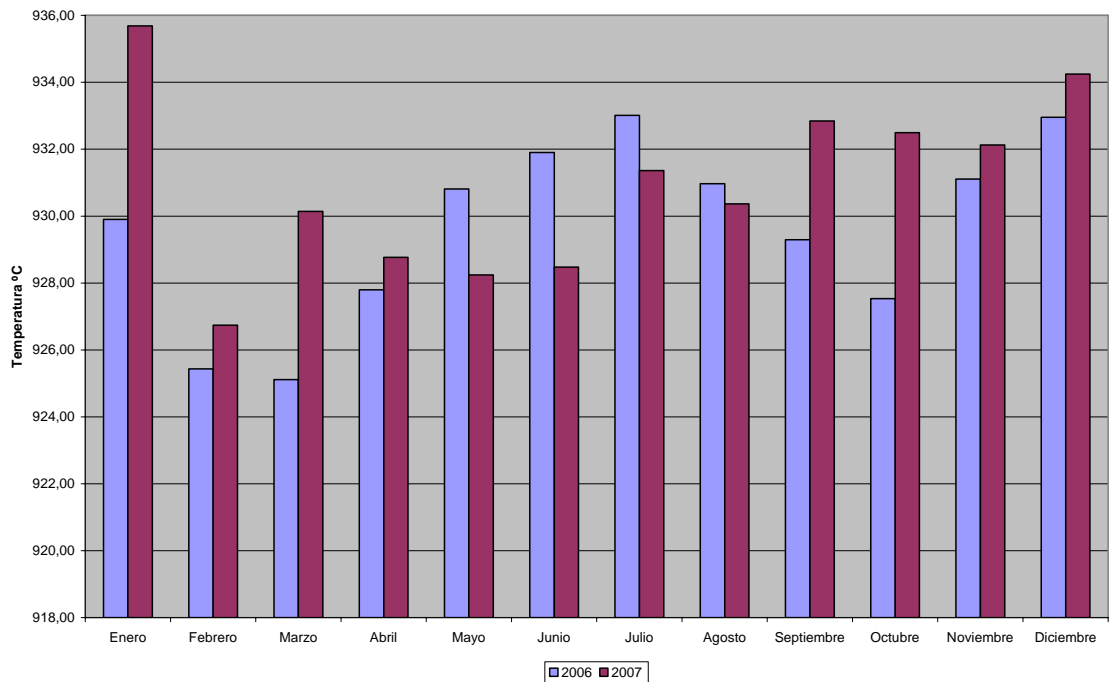
**Figura 23. Comportamiento del promedio mensual de la presión atmosférica en 2006 y 2007 en todas las estaciones de la cueva.**

La diferencia entre las estaciones no es siempre la misma, ya que diferentes factores físicos y termodinámicos favorecen el desequilibrio entre los diferentes puntos de la cueva. La morfología de los diferentes sectores es una de las causas. En una zona de estrechamiento entre dos salas se producen en sus extremos varios fenómenos, que favorecen un desbalance de la presión.

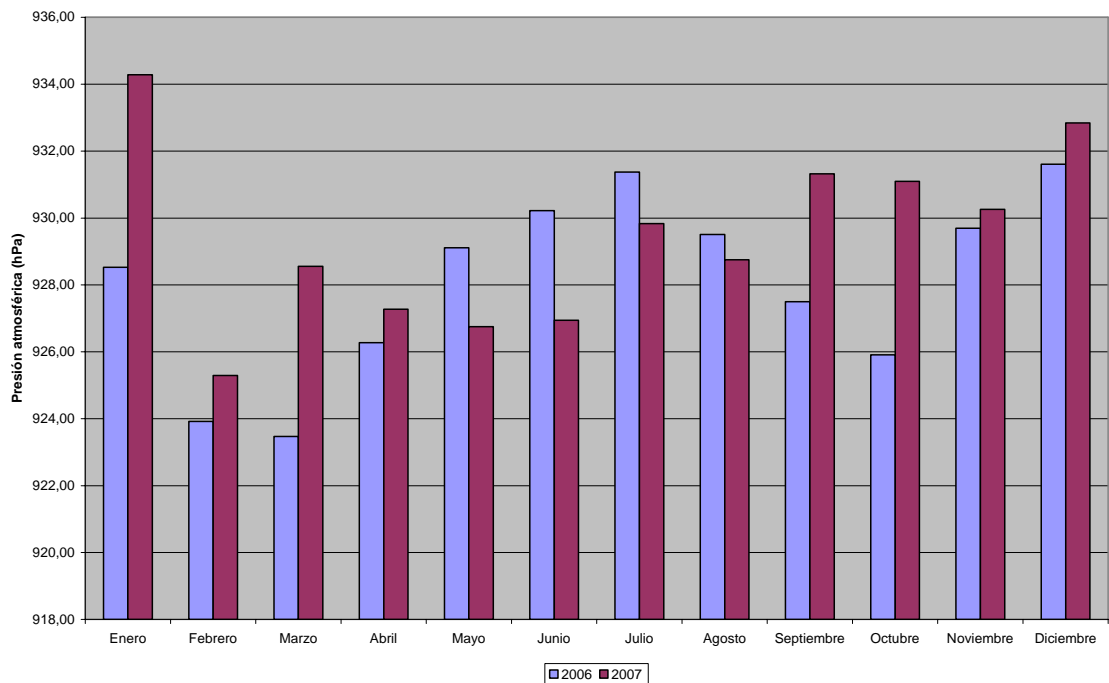
Factores como el trabajo de expansión, la presión motriz, la presión parcial de CO<sub>2</sub>, la presión parcial de vapor de agua, la entalpía y la entropía, son algunos de los que provocan estas diferencias, favoreciendo la formación de corrientes de aire entre las salas.

Hasta el momento el comportamiento de la presión atmosférica no ha mostrado un patrón cíclico anual. Durante el año 2006 presentó valores máximos en los meses de julio y diciembre, con valores mínimos en marzo y octubre. El 2007 tuvo un

comportamiento totalmente diferente. La curva de la presión mostró en este año varios puntos máximos y varios mínimos, con una fuerte tendencia al incremento de los valores durante todo el periodo (figura 23).



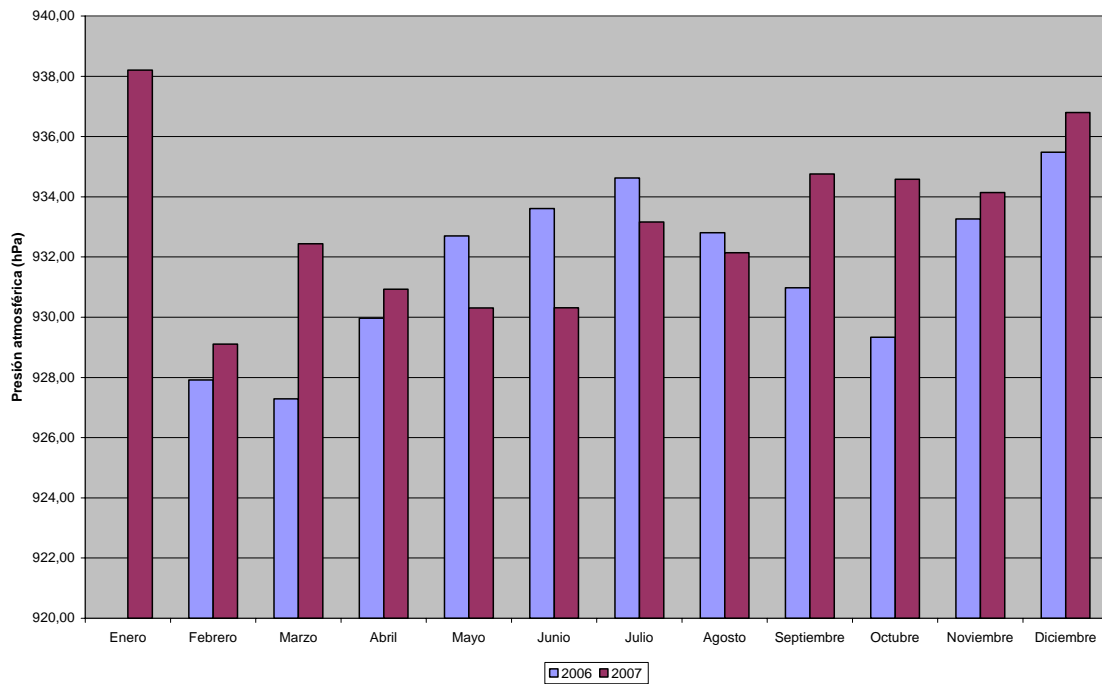
**Figura 24.** Comportamiento del promedio mensual de la presión atmosférica en 2006 y 2007 en la estación Edificio.



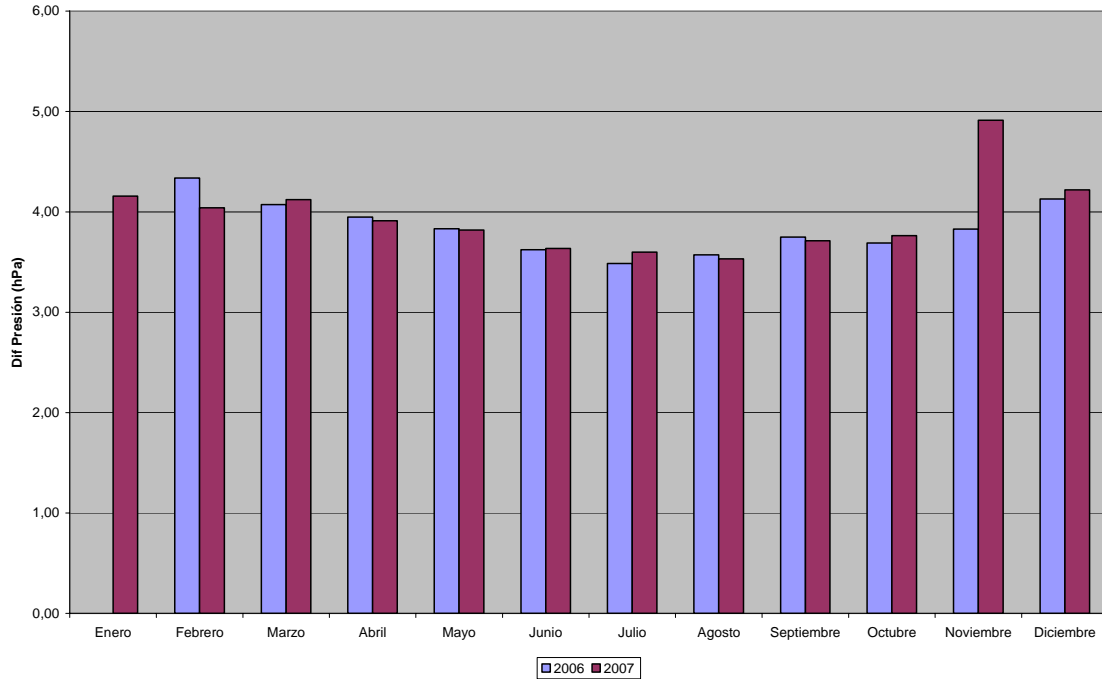
**Figura 25.** Comportamiento del promedio mensual de la presión atmosférica en 2006 y 2007 en la estación Entrada.

En las figuras 24 a la 26 se compara el comportamiento de la presión atmosférica en las diferentes estaciones, entre ambos años, apreciándose un comportamiento similar en ellos, con diferencias muy pequeñas.

Al comparar los valores del promedio de las estaciones interiores, con la sala Entrada, se aprecia un comportamiento variable de la diferencia de presiones en ambos años. Aunque la diferencia se mantiene a favor de Entrada, por su diferencia de altura respecto al interior, el equilibrio entre ambos sectores no se mantiene igual en los diferentes meses, incluso en el mismo mes en años sucesivos, lo que habla de un equilibrio inestable entre la atmósfera hipogea y la epigea (figura 27).



**Figura 26. Comportamiento del promedio mensual de la presión atmosférica en 2006 y 2007 en la estación Laminosin.**

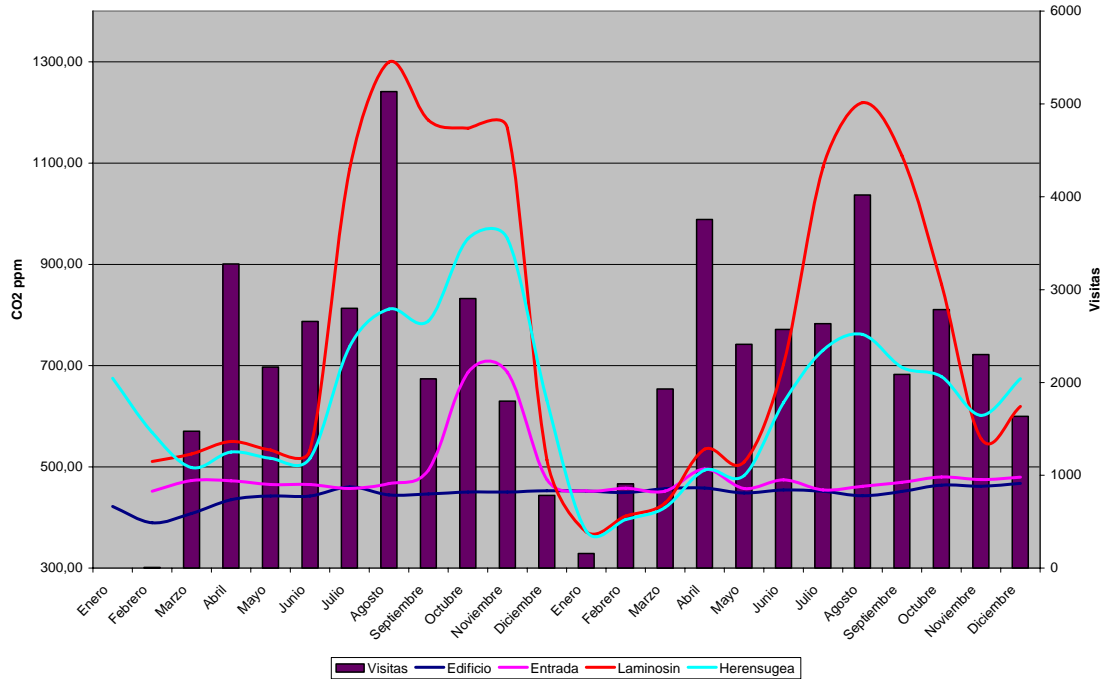


**Figura 27.** *Diferencia de presión entre el promedio de las estaciones interiores y la estación Entrada.*

### 3.3. CO<sub>2</sub>.

El CO<sub>2</sub> es el gas que más se sigue en los estudios climáticos de las cuevas adaptadas al turismo. Una concentración muy elevada provoca la corrosión de las formaciones secundarias, destruyendo así el potencial turístico y, por tanto, parte del patrimonio geológico que ofrece la cavidad.

La concentración límite de CO<sub>2</sub> que marca la ruptura del equilibrio químico en la cueva de Mendukilo no está bien definida, pues son muchos los factores que intervienen en el mecanismo de la corrosión. Entre estos está el tiempo de duración de la concentración del gas en la atmósfera, cantidad de agua disponible sobre las paredes o las formaciones, temperatura del agua y el aire, entre otros.



**Figura 28. Comportamiento del promedio mensual de la concentración de CO<sub>2</sub> en las estaciones y su relación con el régimen de visitas.**

Está comprobado que, en la cueva Mendukilo, la fuente fundamental de CO<sub>2</sub> es la masa de visitantes. Es evidente la relación entre el número de personas que entran a la cueva y los valores que alcanza. En la cueva Mendukilo los valores reportados no sólo dependen de las visitas, también del lugar donde se ubica la sonda de medición.

En Laminosin la sonda se ubica dentro del recorrido de la pasarela, quedando rodeada de las personas en las visitas. Prácticamente el gas es lanzado directamente hacia la sonda, por lo que los valores reportados son muy elevados respecto a Herensugea, la otra estación ubicada en el interior de la cueva.

En el caso de Herensugea, la disposición espacial de la estación favorece que la concentración medida sea más representativa del promedio de la sala, por lo que su valor es muy inferior al de Laminosin. Esta es la causa de la diferencia de concentraciones entre ambas estaciones y la aparente diferencia de velocidad de recuperación hasta valores más naturales.

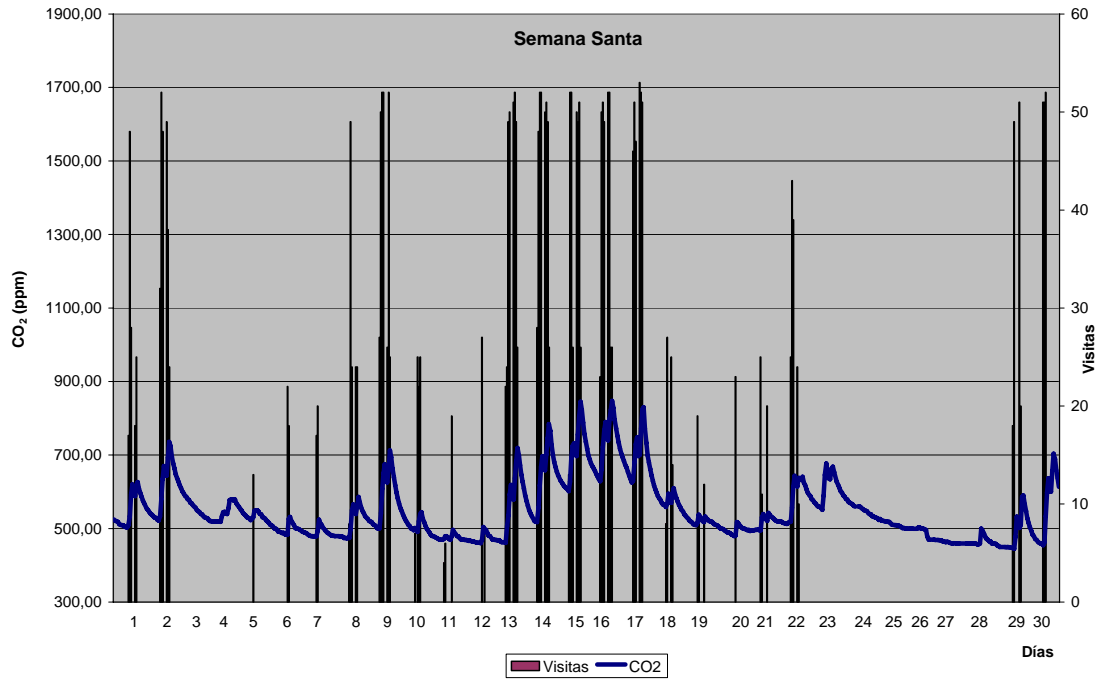
Esa es la razón por la que en Herensugea se aprecia mejor el efecto acumulativo de CO<sub>2</sub>, ya que la difusión del gas por el resto de la sala en Laminosin, enmascara el tiempo de real que se mantienen los valores de concentración.

El CO<sub>2</sub> presenta un comportamiento interesante, la curva de los promedios mensuales refleja que, el mes de abril, a pesar de ser el segundo mes en cantidad de visitantes, no hay un incremento significativo de la concentración del gas.

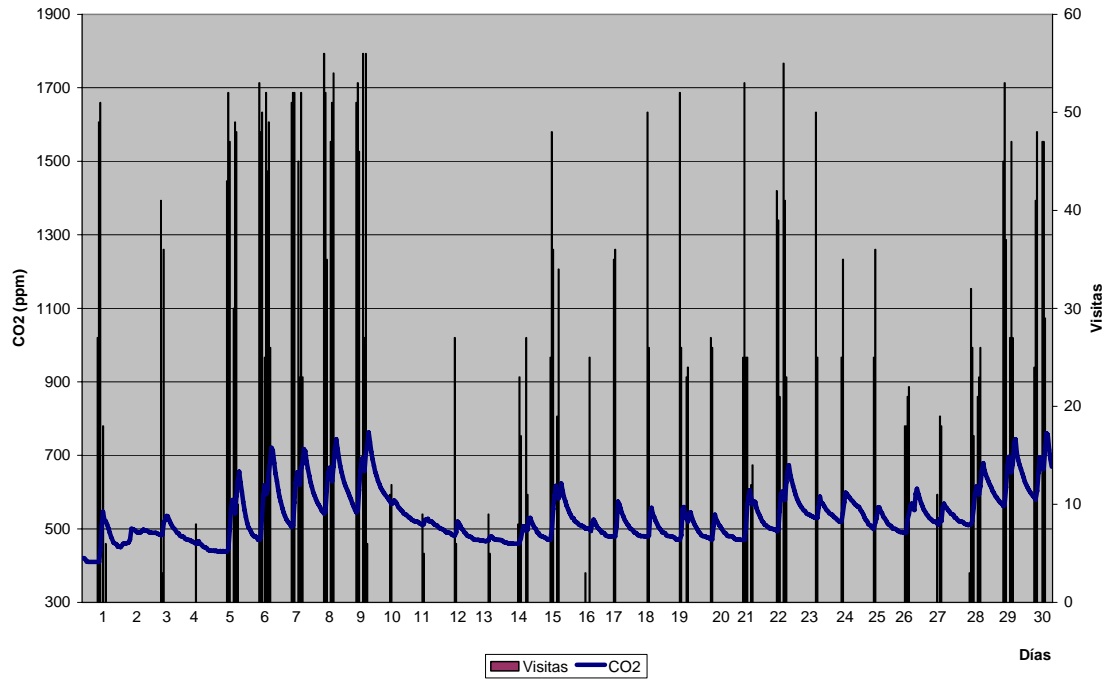
La causa de este comportamiento es la siguiente: en los primeros meses del año el promedio diario de personas en la cavidad fue en enero de 5,1, en febrero de 32,4 y en marzo de 62,3. En el último mes la distribución de las visitas no fue homogénea,

concentrándose el mayor número en los fines de semana, quedando entre 5 y 6 días de recuperación, lo que no favorece el desarrollo del efecto acumulativo.

Durante el mes de abril, en general las visitas aumentan de forma sensible, concentrado el mayor número en el periodo de Semana Santa (figuras 29 y 30), donde se aprecia el efecto acumulativo entre los días que tienen lugar los máximos de visitas.



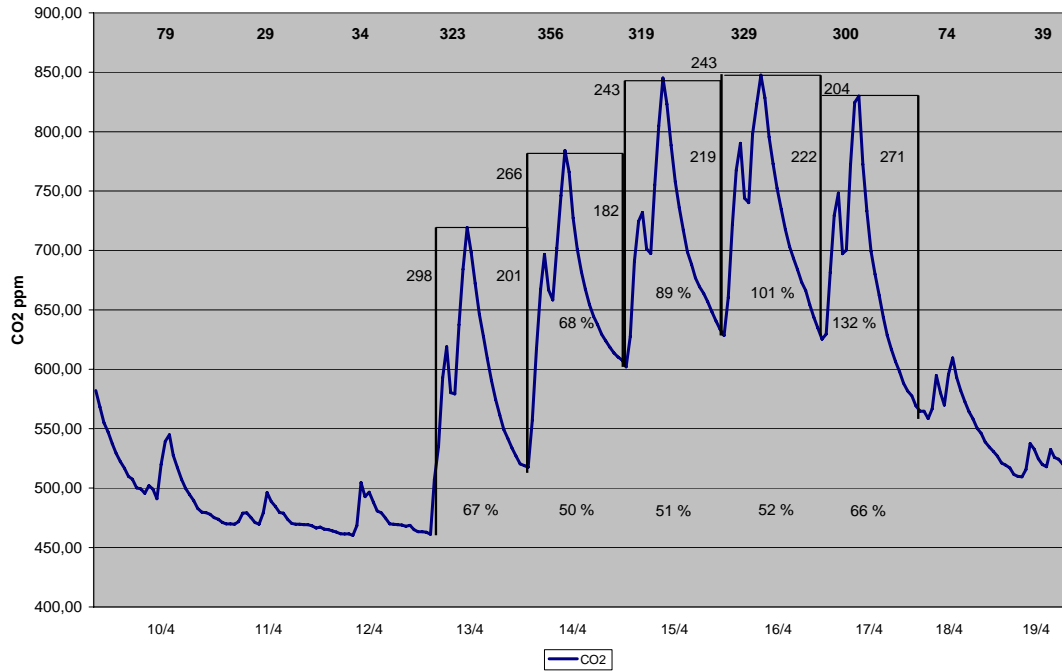
**Figura 29. Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en abril de 2006 en la estación Laminosin.**



**Figura 30. Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en abril de 2007 en la estación Laminosin.**

La recuperación de la cueva a la concentración de CO<sub>2</sub> es bastante rápida, atendiendo a la morfología de la misma y el mecanismo de circulación en saco de aire. En el mes de abril se aprecia que el efecto acumulativo, aunque está presente, no tiene grandes implicaciones. La baja cantidad de visitantes en los primeros meses del año favorece el desplazamiento del CO<sub>2</sub> fuera de la cueva, por lo que los salones interiores presentan concentraciones mínimas, prácticamente naturales. El gas se puede difundir con mayor rapidez y distribuirse por toda la cavidad reduciendo su concentración promedio, pues debe recordarse que los picos elevados en la concentración de CO<sub>2</sub> medidos son puntuales, debido a la ubicación de la estación dentro del recorrido de la pasarela, por lo que la sonda queda rodeada de la fuente emisiva del gas.

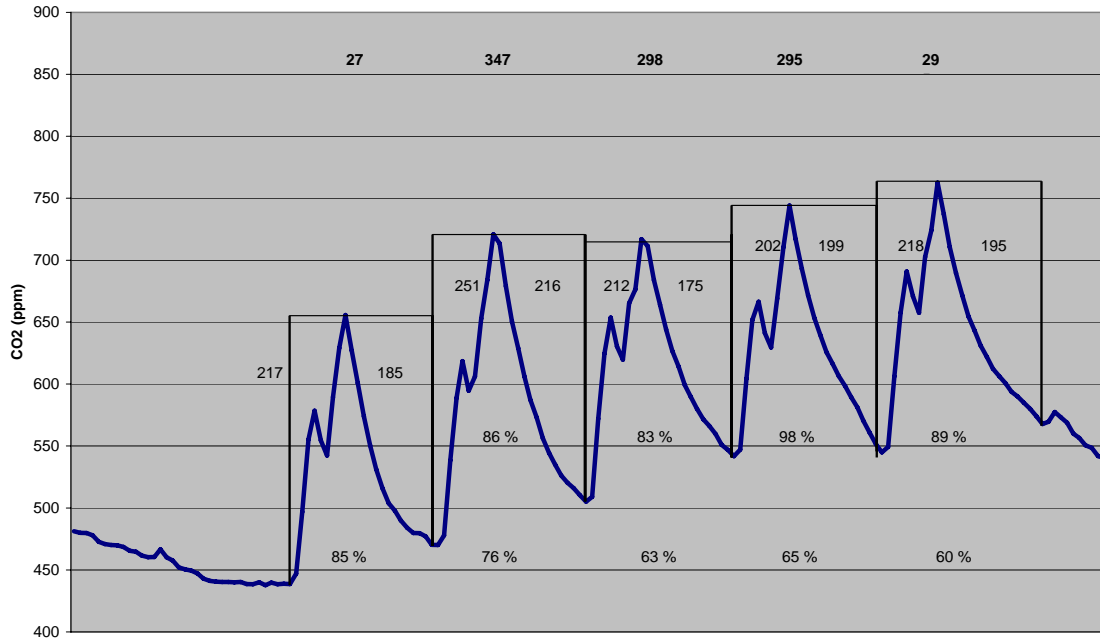
Las diferencias de los máximos de concentración durante la Semana Santa en ambos años, tienen dos causas fundamentales: un descenso de la cantidad de visitantes en el año 2007 y la diferencia del volumen de agua acumulado en la cueva. En el año 2006 los volúmenes de agua en la cueva fueron inferiores a los acumulados en el 2007, lo que favorece la difusión del gas en el líquido.



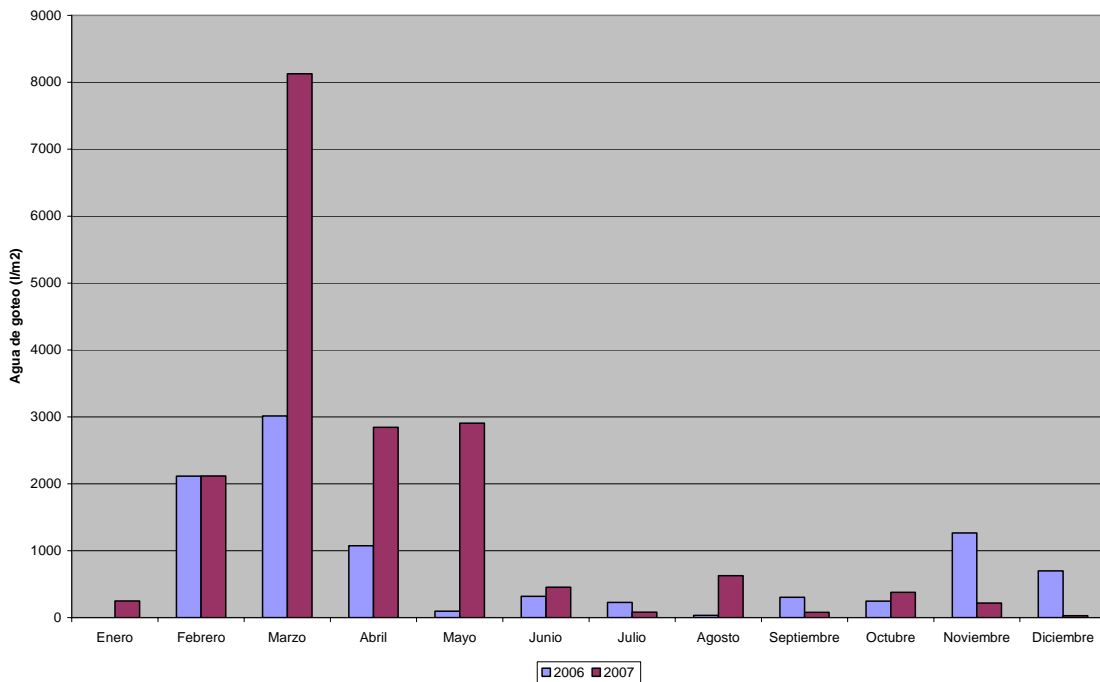
**Figura 31. Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en Semana Santa de abril de 2006 en la estación Laminosin. Se aprecia los incrementos de la concentración de CO<sub>2</sub> y los porcentajes de recuperación respecto al inicio del día y al inicio de la semana, los ppm que incrementa y recupera en el día.**

Los valores de goteo en la estación Laminosin fueron muy superiores en el año 2007, donde los meses principales de entrada de agua a la cueva fueron entre marzo y mayo, con acumulados que duplican al año anterior (figura 33).

La distribución heterogénea del régimen de goteo en la cueva no permite establecer, de forma cuantitativa, los volúmenes de agua acumulados. El muestreo realizado informa, de forma semicuantitativa, las cantidades de agua que entran al sistema, coincidiendo con las observaciones cualitativas hechas durante los muestreos de hidroquímica, clasificando los acumulados como mucha, poca o muy poca agua.



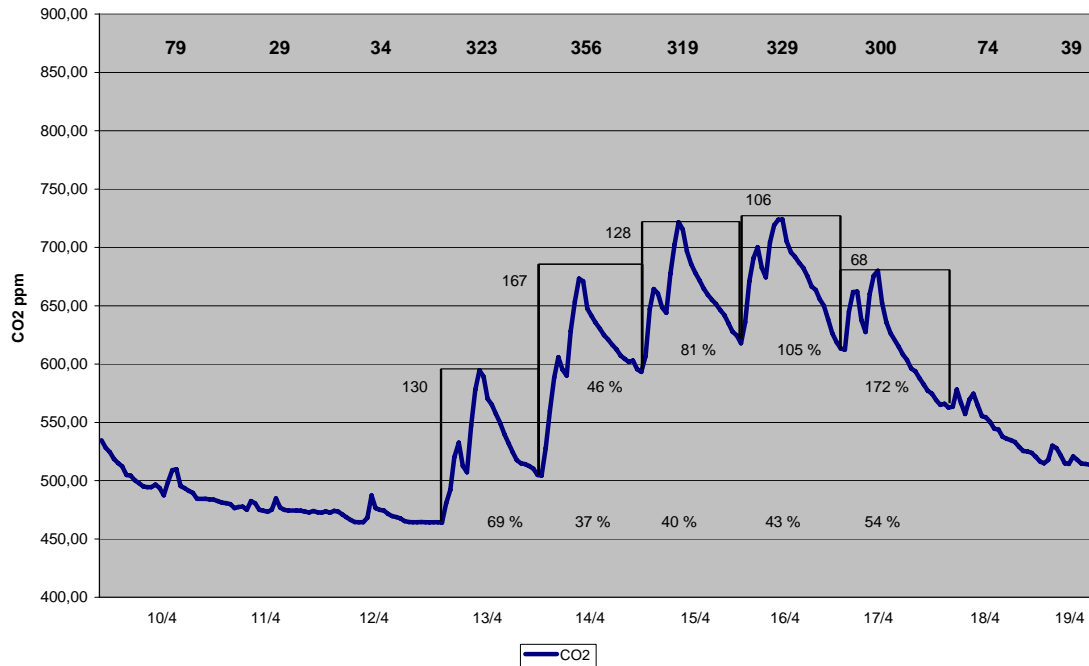
**Figura 32.** Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en Semana Santa de abril de 2007 en la estación Laminosin. Se aprecia los incrementos de la concentración de CO<sub>2</sub> y los porcentajes de recuperación respecto al inicio del día y al inicio de la semana, los ppm que incrementa y recupera en el día.



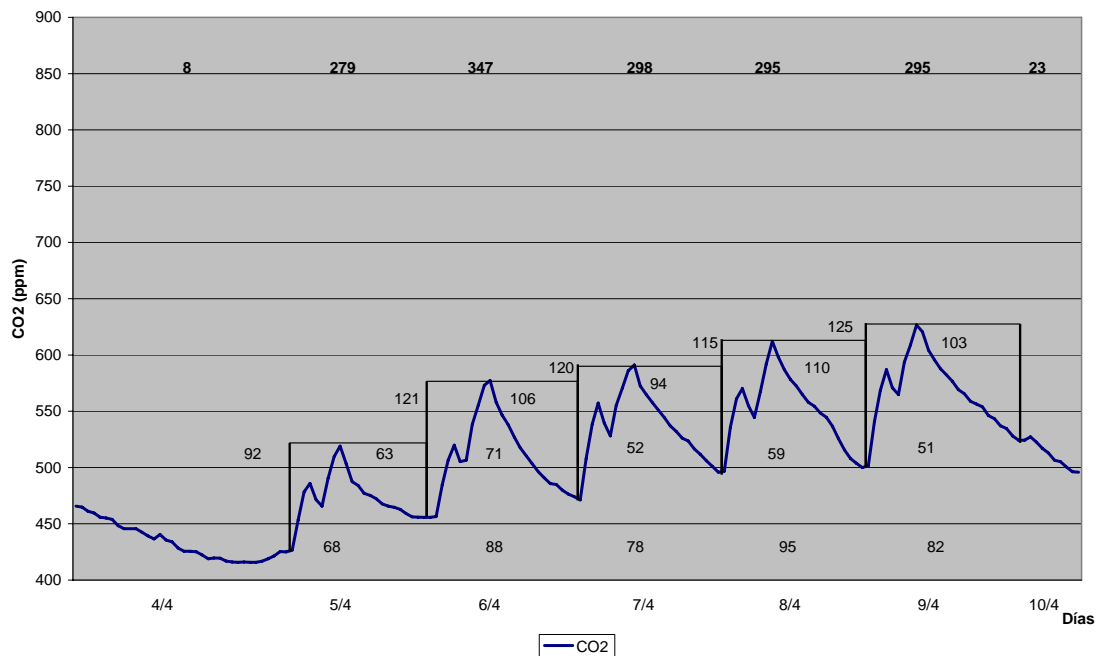
**Figura 33.** Comportamiento del acumulado mensual del agua de goteo durante el periodo total de mediciones.

De forma similar se manifiesta en la sala Herensugea, con valores de concentración inferiores, por las razones antes expuestas. La falta de datos de un año sin visitas no permite la comparación del comportamiento actual de CO<sub>2</sub> con su comportamiento natural, por lo que solo a través de una serie de mediciones de varios años, se podrá

determinar cuando los valores mínimos son cercanos a los naturales y cuando está representado el efecto acumulativo en la curva anual.



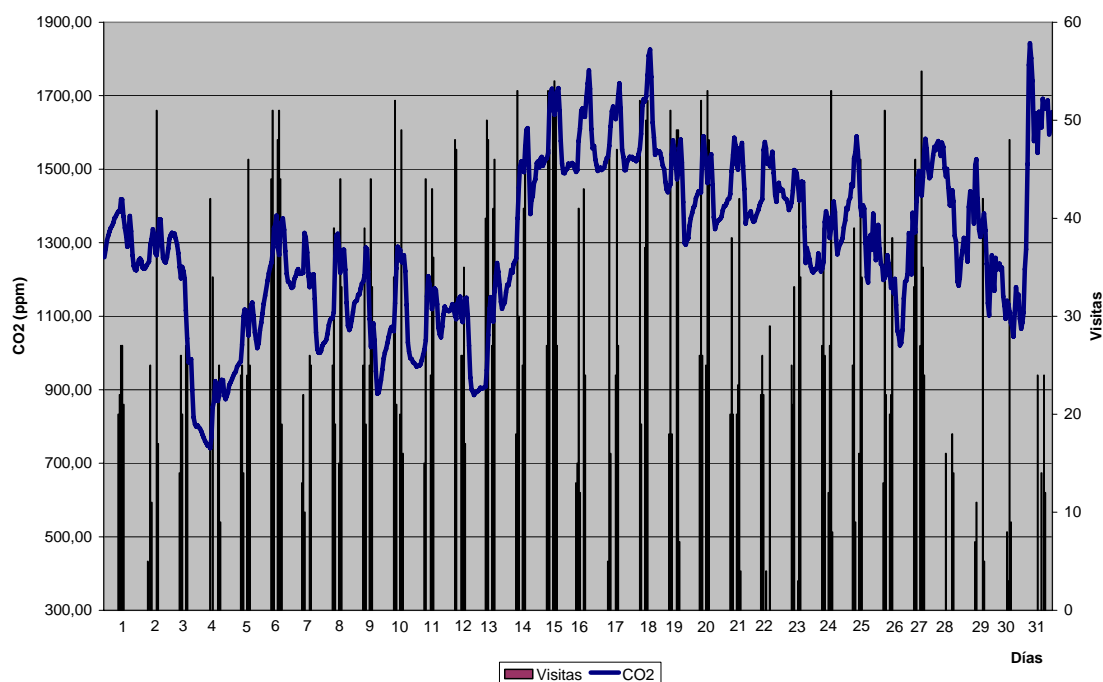
**Figura 34.** Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en Semana Santa de abril de 2006 en la estación Herensugea. Se aprecia los incrementos de la concentración de CO<sub>2</sub> y los porcentajes de recuperación respecto al inicio del día y al inicio de la semana, los ppm que incrementa y recupera en el día.



**Figura 35.** Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en Semana Santa de abril de 2007 en la estación Herensugea. Se aprecia los incrementos de la concentración de CO<sub>2</sub> y los porcentajes de recuperación respecto al inicio del día y al inicio de la semana, los ppm que incrementa y recupera en el día.

El comportamiento del efecto acumulativo durante el periodo de Semana Santa del año 2006 fue similar al del mismo periodo en el año 2007. Un incremento inicial de los valores mínimos diarios, con una recuperación de sólo el 50 al 52 % de la concentración del CO<sub>2</sub> en Laminosin. En Herensugea la recuperación fue, sólo de 40 al 43 %. Durante el 2007 la recuperación en ambas estaciones fue superior, un 60 al 63 % en Laminosin y 57 al 59 % en Herensugea.

Estos valores indican que la cueva está reacomodando sus mecanismos de intercambio con el exterior, en los momentos de máxima carga, modificando el equilibrio natural entre las diferentes variables en los distintos sectores.

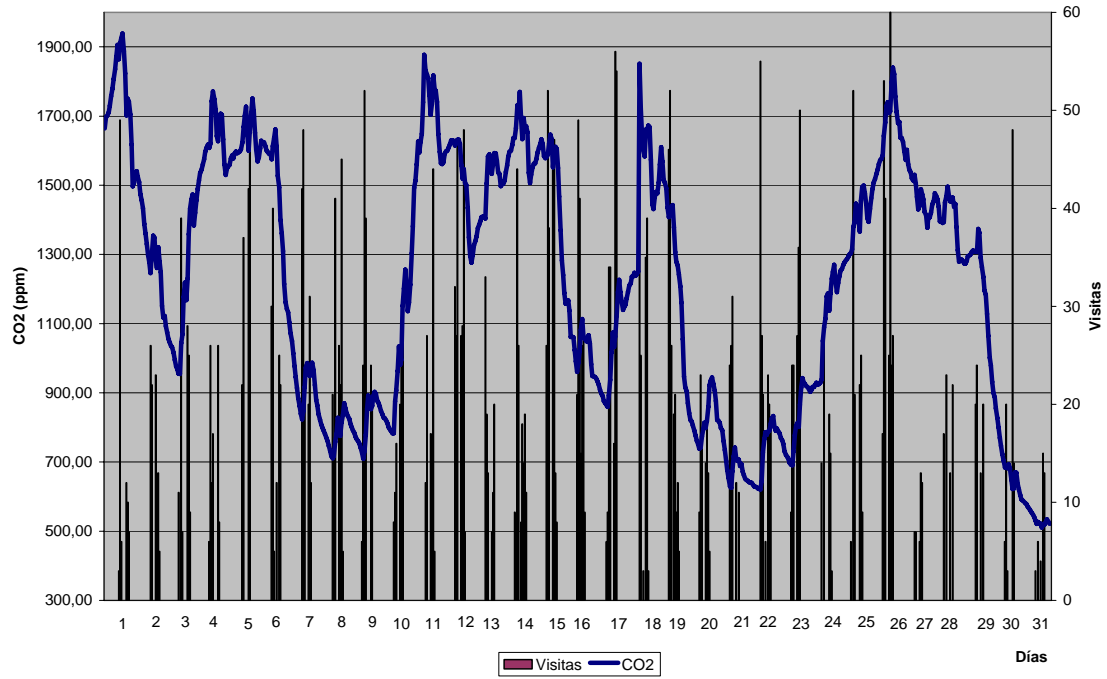


**Figura 36. Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en agosto de 2006 en la estación Laminosin.**

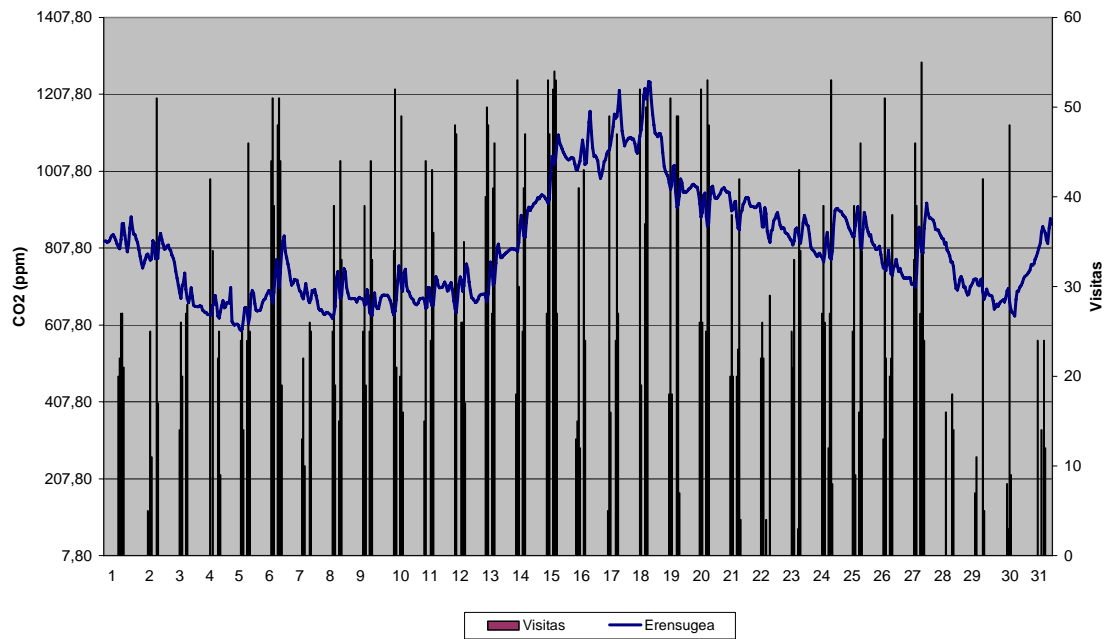
Agosto es el mes con valores de concentración de CO<sub>2</sub> máximos, en correspondencia con el régimen de visitas. La acción continua de la fuente del gas no favorece la recuperación de la cueva. Sólo en los días que se reduce la cantidad de visitantes se aprecia un descenso en los valores, con una velocidad de recuperación bastante elevada, llegando a descender más de 500 ppm en menos de 20 horas en la sala Laminosin (figuras 35 y 36).

En el año 2007, condicionado por un descenso en la cantidad de visitantes, se aprecia mejor los periodos de recuperación, aun con un régimen de visitas sostenido (figura 36).

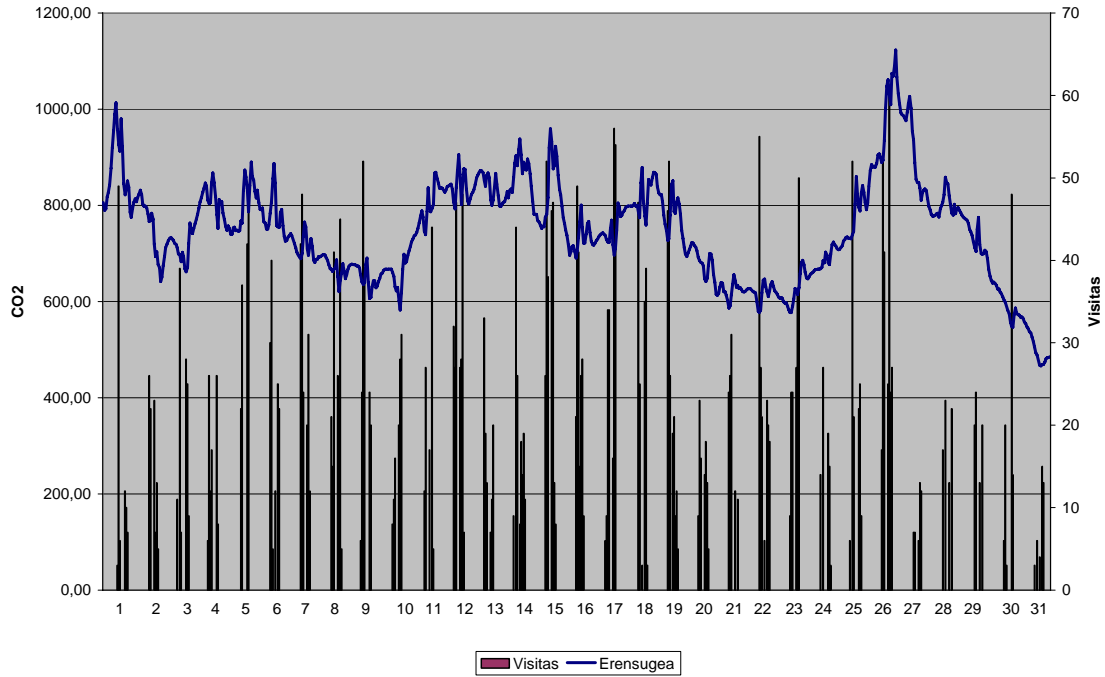
En el sector Herensugea se aprecia un comportamiento diferente. Durante todo el mes de agosto de 2006 se manifiesta el efecto acumulativo del CO<sub>2</sub>, aunque los valores no son muy elevados. Con el incremento de la frecuencia de visitantes diarios, la concentración se elevó, desde un valor medio de 700 ppm hasta máximos de 1250 ppm aproximadamente, con una recuperación bastante rápida hasta los 900 ppm, donde se estabilizó, oscilando entre los valores de 700 a 900, por falta de tiempo para una recuperación completa (figura 38).



**Figura 37. Relación del comportamiento de la concentración de  $CO_2$  respecto a las visitas en agosto de 2007 en la estación Laminosin.**

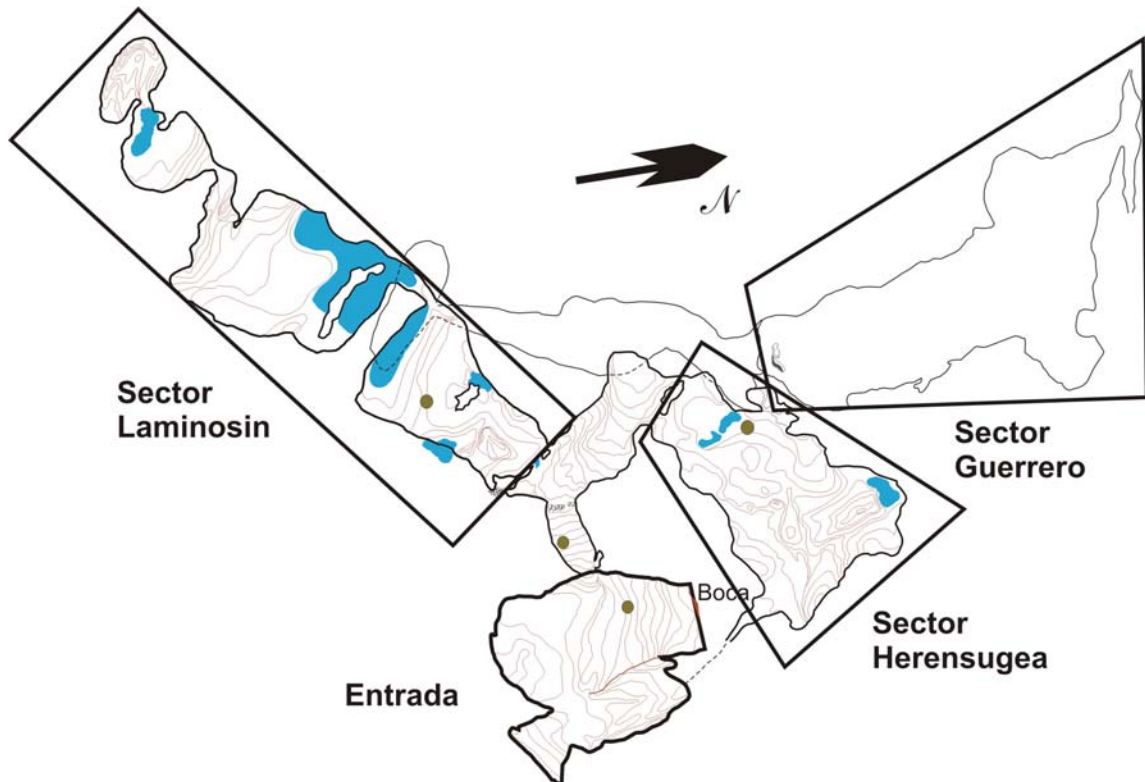


**Figura 38. Relación del comportamiento de la concentración de  $CO_2$  respecto a las visitas en agosto de 2006 en la estación Herensugea.**



**Figura 39. Relación del comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto a las visitas en agosto de 2007 en la estación Herensugea.**

La combinación de los factores climáticos antes explicados y el descenso de la cantidad de visitantes, propició un comportamiento diferente del CO<sub>2</sub> en agosto de 2007. La concentración del gas se mantuvo con valores inferiores a los 900 ppm, con picos máximos aislados, sobrepasando el valor de los 1000 ppm en sólo tres días.



**Figura 40. Subdivisión de la cueva en sectores en la zona interior.**

Para una mejor comprensión de los procesos que tienen lugar en la cueva, esta se dividió en tres sectores en la zona más estable desde el punto de vista climático. El sector Laminosin, Herensugea y Guerrero (figura 40). Las áreas y volúmenes de cada uno de ellos se presentan en la tabla XI.

| Sector     | Área<br>m <sup>2</sup> | Volumen<br>m <sup>3</sup> |
|------------|------------------------|---------------------------|
| Laminosin  | 1877                   | 18770                     |
| Herensugea | 1473                   | 22095                     |
| Guerrero   | 2089                   | 30060                     |

**Tabla XI. Áreas y volúmenes de la zona interior de la cueva.**

La morfología del sector Laminosin permite una dinámica de la atmósfera muy particular. La presencia de lagos, cuando están activos, son una fuente generadora de fluidos. Ellos favorecen el intercambio de masa y energía entre las masas de agua, la roca y el aire. La forma alargada de la galería con estrechamientos entre las pequeñas salas que conforman el sector, provocan un retardo en la circulación atmosférica. La inercia de la respuesta de la zona más profunda del sector va a depender directamente, de la cantidad de agua que llena los lagos.

La diferencia de concentración de CO<sub>2</sub> entre éste sector y Herensugea, radica en los accidentes morfológicos que presentan, además del aspecto antes mencionado de la cercanía de las sondas a la pasarela. El sector Herensugea, con un volumen superior, está interconectado con otros dos sectores: Guerrero, el sector de mayor volumen, y Entrada.

La relación de Herensugea con Entrada favorece la formación de una circulación muy cercana al tubo de viento (Otero *et. al.* 2006). Esta es una de las causas que favorecen una menor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Otra es la conexión con el sector Guerrero, el de mayor volumen de la cavidad.

### **3.3.1. Aporte de CO<sub>2</sub> por los humanos.**

El aporte de CO<sub>2</sub> por parte de los visitantes, en ppm, oscila en dependencia de la concentración existente en la cueva, cantidad de visitantes y si el aire entra o sale del sector. Por ser en Laminosin donde más cerca pasan los visitantes de las sondas de medición, se adoptó esta estación para calcular el aporte. Los cálculos se realizaron en Semana Santa en ambos años. Además, el 21 de enero de 2007 se realizó un experimento, entrando a la cueva 149 personas, en dos grupos: uno a las 12:00 de 64 y el segundo a las 13:00 horas de 85 personas.

En las tablas XII, XIII y XIV se aprecia que, sólo durante el primer día de visitas, el aporte de CO<sub>2</sub> al aire es importante. El resto de los días tiende a descender. Prueba de lo anterior es el resultado del experimento realizado el 21 de enero de 2007. Como antecedente se reporta un régimen de visitas prácticamente nulo durante ese mes. La ruptura del equilibrio por la masa de visitantes se hace evidente en la cantidad de ppm

por persona que se reporta para esa fecha. Lo mismo ocurre el primer día de Semana Santa del año 2006.

El régimen de visitas de los primeros días del mes de abril, en ambos años, se comportó de forma similar. El espacio de tiempo entre un grupo numeroso y el comienzo de Semana Santa fue de seis días en el año 2006 y sólo tres en el 2007. Esta diferencia queda marcada en el promedio de ppm por visitante.

| Semana Santa 2006 |            |               |
|-------------------|------------|---------------|
| $\Delta$ ppm      | Visitantes | ppm/visitante |
| 298               | 323        | 0,92          |
| 266               | 356        | 0,75          |
| 243               | 319        | 0,76          |
| 243               | 329        | 0,74          |
| 204               | 300        | 0,68          |

**Tabla XII.** Aporte de CO<sub>2</sub> de las visitas en los días de Semana Santa del año 2006.

| Semana Santa 2007 |            |               |
|-------------------|------------|---------------|
| $\Delta$ ppm      | Visitantes | ppm/visitante |
| 217               | 279        | 0,78          |
| 251               | 347        | 0,72          |
| 212               | 298        | 0,71          |
| 202               | 295        | 0,68          |
| 218               | 295        | 0,74          |

**Tabla XIII.** Aporte de CO<sub>2</sub> de las visitas en los días de Semana Santa del año 2007.

| 21 de enero de 2007 |            |               |
|---------------------|------------|---------------|
| $\Delta$ ppm        | Visitantes | ppm/visitante |
| 163,3               | 149        | 1,10          |

**Tabla XIV.** Aporte de CO<sub>2</sub> de las visitas durante el experimento realizado el 21 de enero de 2007.

La reducción del aporte a la concentración de CO<sub>2</sub> por persona no implica que, a mayor concentración en la atmósfera menos aporte, como parecen indicar los datos. La cantidad de CO<sub>2</sub> aportado a la atmósfera por las visitas, dependerá únicamente de las características físicas de las personas, ritmo respiratorio, edad, sexo, preparación física, entre otros aspectos.

La variación del aporte que se aprecia en las tablas anteriores se debe a la ruptura del equilibrio de la masa gaseosa. El sistema, en un equilibrio inestable generado por las visitas de los días anteriores, incrementa la velocidad de intercambio de masa con el resto de los sectores de la cueva. El gas aportado por las personas no tiene que romper la inercia de la atmósfera en equilibrio, sólo incorporarse las corrientes, a menudo a nivel molecular, que han generado las visitas de los días anteriores.

Un descenso en la cantidad de personas favorece una reducción de la circulación, donde la masa trata de alcanzar el equilibrio perdido, por lo que un nuevo incremento de las visitas recomienza el ciclo explicado.

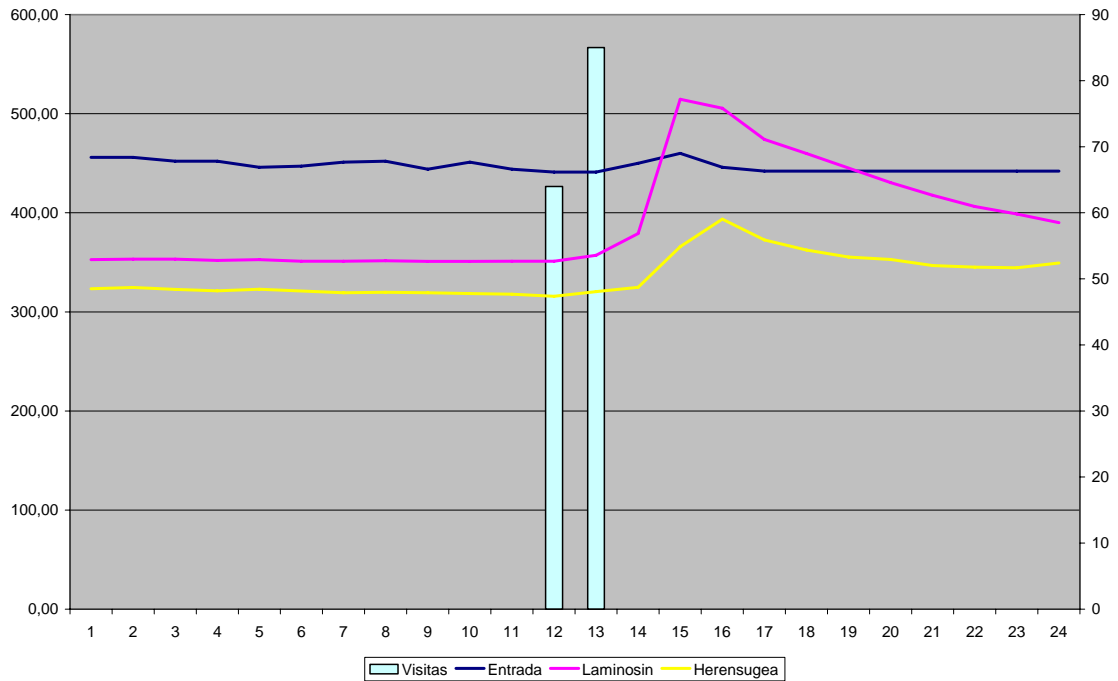


Figura 41. Respuesta de la cueva en un experimento para determinar la concentración de  $CO_2$  en las diferentes estaciones de la cueva.

Cada grupo de visitantes es sí es una fuente de aporte de masa y energía al sistema subterráneo. El calor desprendido por la masa humana forma una celda de convección, favoreciendo la formación de un sistema de microcorrientes localizadas que acompañan al grupo (figura 42).



Figura 42. Formación de una celda de convección. Ver explicación en el texto.

La temperatura promedio del grupo de visitantes oscila entre 36 y 37 °C, dependiendo de la temperatura exterior, ropa, ejercicios realizados, entre otros factores. Tomando en consideración que la temperatura promedio en las estaciones del interior de la cueva oscila entre 8 y 9 °C, la diferencia de la temperatura entre el aire que rodea la masa humana y el resto del sistema será de unos 28 °C.

Además del calor radiado por el grupo humano, cada persona exhala cierta cantidad de CO<sub>2</sub> y agua en forma de vapor al respirar. Estos gases, junto al aire que conforma la capa límite que rodea cada cuerpo, ascienden por convección, intercambiando masa y energía con la atmósfera circundante.

Cuando la atmósfera de la cueva se encuentra en equilibrio, lo que sucede cuando no ha sido alterada por fuentes de masa y energía externas, la celda de convección es más pequeña. La masa gaseosa desprendida por los visitantes se enfría rápidamente. El CO<sub>2</sub> contenido en esta masa va a descender, disminuyendo la energía cinética de sus moléculas, reduciéndose al mismo tiempo la velocidad de difusión.

En los periodos de mayor afluencia de público a la cueva, la atmósfera cavernaria entra en un equilibrio inestable, concentrándose las masas con mayor entalpía cerca del techo. Esto favorece que, con la entrada de cada nuevo grupo, parte del aire caliente que desprenda, se mezcle al ascender, con la masa de aire superior, manteniendo una porción de la energía interna original, lo que favorece una mayor velocidad de difusión.

Este mecanismo permite que la disminución de la concentración de CO<sub>2</sub> sea mayor, favoreciendo la expansión del gas más rápidamente por toda la cueva y, finalmente, hacia el exterior.

### **3.4. Comportamiento de la entalpía y la entropía en la cueva.**

La entalpía, en su concepto más general, representa la cantidad de calor que un sistema puede intercambiar con el entorno (Enciclopedia Wikipedia 2008). Partiendo de esta afirmación, se puede realizar el balance térmico entre el sistema exterior de la cueva y el interior, a partir del balance de la entalpía.

En el caso del algoritmo de cálculo utilizado en este trabajo, la entalpía representa, además, el calor cedido o absorbido por la variación del estado de humidificación de la masa gaseosa (Otero 1992). Teniendo en cuenta el carácter endotérmico de la evaporación y exotérmico de la condensación, las variaciones térmicas generadas por estos procesos se reflejarán en la variación de la entalpía (Eraso 1965, 1969).

La entropía se conceptualiza como la cantidad de energía que se mantiene en el sistema y que no puede realizar un trabajo (Enciclopedia Wikipedia 2008).

Teniendo en cuenta el enunciado de la Segunda Ley de la Termodinámica, que expresa que los fluidos térmicos siempre van a moverse desde los cuerpos más calientes hacia los más fríos, se puede tener una idea de cómo será la circulación de un gas en particular.

Otros parámetros que influyen en el movimiento son la densidad, la presión, cambios de volumen y concentración.

En el caso del aire atmosférico, se asumen tres componentes principales, que son los que van presentar mayor variabilidad: el vapor de agua, el CO<sub>2</sub> y el aire seco (como la diferencia entre la composición total del aire y la suma de los componentes antes mencionados).

La entalpía, definida por el calor de mezcla del aire húmedo y seco, se expresa por la siguiente expresión, donde H es la entalpía en kJ, t es la temperatura del aire en °C y Habs es la humedad absoluta en kg/kg:

$$H = (0,24*t + Habs *(597 + 0,46*t)) * 4,18$$

La entropía, definida en forma genérica como el grado de desorganización del sistema se calcula a partir de la siguiente expresión donde S es la entropía en kJ, Tv es la Temperatura virtual<sup>1</sup> y P la presión atmosférica en hPa:

$$S = ((1003*\ln(Tv * 273.15)) - (0,287 *\ln(P))) * 4,18$$

Entre ambos parámetros se contemplan dos de los componentes principales de la atmósfera: el aire seco y el vapor de agua. El CO<sub>2</sub> se analizó en un acápite aparte por sus características muy propias, aunque su influencia está presente en la densidad del aire, que lo toma en cuenta, como se mencionó anteriormente.

Teniendo en consideración la dependencia de la entalpía y la entropía de la temperatura y que la entalpía se considera una expresión térmica, siguiendo el segundo principio de la termodinámica antes mencionado, se puede concluir que los procesos de transferencia de masa y energía ocurrirán en la dirección del incremento de ambas variables.

Para determinar el comportamiento de la masa gaseosa, se realizó un balance de entalpía, tomando como referencia el comportamiento de la misma en la cueva en general, desde las estaciones interiores hacia las exteriores:

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

Para generalizar y poder comparar el comportamiento de estos parámetros con los anteriormente estudiados, específicamente la temperatura del aire y la concentración de CO<sub>2</sub>, se realizó la sumatoria de estas diferencias en cada mes, aprovechando la propiedad de aditividad que, desde el punto de vista termodinámico tienen ambas variables (Otero 1993, 1995, 2004, 2005, 2006 a, 2006 b).

Para su análisis mensual se calculó la sumatoria y no el promedio ya que la primera describe mejor, atendiendo a la propiedad antes mencionada, el balance de ambos parámetros, entalpía y entropía, entre los sistemas cueva y exterior que el segundo.

En un sistema en equilibrio, la cantidad de energía que entra del sistema debe ser igual a la que sale. Solo la acción de fuentes externas rompe esta igualdad.

---

<sup>1</sup> Temperatura virtual: Es el valor que alcanzaría la temperatura del aire a una densidad dada, si se le elimina toda la humedad.

En la cueva Mendukilo existe una ruptura evidente del equilibrio térmico. Entre los meses de abril y octubre se aprecian valores muy superiores a los calculados para el periodo entre octubre y abril. Esto se puede interpretar como una ganancia de calor por parte de la cueva (figura 43 y tabla XV). Los cambios de signo implican cambio en la dirección del intercambio de la energía térmica.

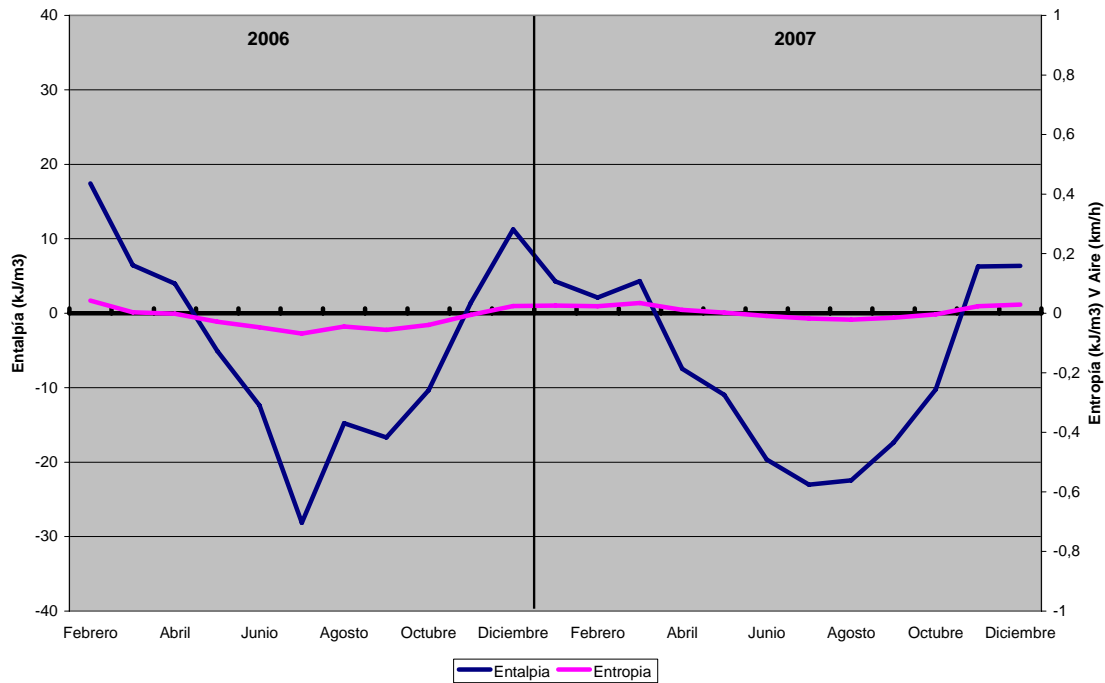


Figura 43. Comportamiento de la sumatoria de la diferencia de entalpía y entropía en la cueva Mendukilo.

|          | Entalpía | Entropía |
|----------|----------|----------|
| Invierno | 63,824   | 0,220    |
| Verano   | -198,589 | -0,360   |

Tabla XV. Suma de los resultados de la entalpía y la entropía durante los meses con igual signo (ver texto). Se denominó a cada periodo como invierno y verano solo para diferenciar los periodos más cálidos de los más fríos.

Es indiscutible la influencia de las visitas en el comportamiento térmico de la cueva. La fuente externa de energía que rompe el balance energético entre los sistemas exterior e interior, es precisamente la masa humana que visita la cueva.

Esta influencia se aprecia, y ya fue comentada anteriormente, en la tabla VIII, donde se presentan los promedios anuales de las estaciones, durante los años 2006 y 2007. A pesar de ser el último año algo más frío, la temperatura en las estaciones interiores sufrió un ligero incremento. Éste incremento fue más evidente en la estación Laminosin, lo que habla a favor de la tesis enunciada en la memoria anterior, sobre la conexión entre el sector final de Herensugea y el fondo de Entrada (Otero *et. al.* 2006).

Al calcular la relación entre los valores reportados en la tabla XV, se aprecia que, durante el verano la cueva recibe 3,11 veces más calor del que entrega en invierno, según la entalpía. Es decir, que la cantidad de energía térmica recibida que puede ser intercambiada, es muy superior a la que entrega directamente al exterior.

En el caso de la entropía, es sólo 1,64 veces superior el valor calculado para el verano sobre el valor obtenido para el invierno. Teniendo en cuenta que este sería la energía acumulada por el sistema, que no produce trabajo ni intercambio, como se mencionó anteriormente, se puede concluir que la cueva presenta una capacidad disipativa de la energía térmica.

Esta capacidad disipativa es precisamente la que permite la formación del equilibrio térmico en el sistema. Este fenómeno es favorecido por varias condiciones:

- La relación entre la zona visitada y la no visitada de la cueva es cercana a 0,5, es decir, que sólo se visita cerca del 25 % de la cueva.
- La amplitud de las salas que favorece una reducción del gradiente de temperatura entre la roca y la masa de visitantes.
- Las cantidades de agua que circulan por la cueva, que aunque no son grandes caudales y su distribución anual no es homogénea, juegan un papel fundamental como regulador térmico, principalmente en la estación Laminosin.
- El régimen de visitas establecido en la cueva, con limitaciones en la cantidad de personas en cada grupo.

Como se ha mencionado anteriormente en el análisis de otros parámetros, al comenzar a explotación de la cueva como centro turístico, se rompe con el equilibrio natural, desestabilizando el sistema que trata de mantener una inercia en su comportamiento energético.

Este fenómeno tuvo lugar en la cueva Mendukilo en el primer año. En la tabla XVI se aprecia el comportamiento de la entalpía y la entropía ganada por la cueva. En 2006, con menor cantidad de calor introducido en la cueva, la energía acumulada fue muy superior a la del 2007.

|               | Entalpía | Entropía |
|---------------|----------|----------|
| Verano 2006   | -87,416  | -0,293   |
| Verano 2007   | -111,173 | -0,068   |
| Invierno 2006 | 40,509   | 0,070    |
| Invierno 2007 | 23,315   | 0,150    |

**Tabla XVI. Comportamiento de las sumatorias de los valores mensuales de la entalpía y la entropía en diferentes temporadas de los años 2006 y 2007.**

Durante el invierno el sistema de la cueva a perdido gran parte de la energía acumulada, principalmente en el último año, aunque el balance general indica que todavía existe una cierta acumulación de calor. Estos valores deben ser seguidos durante varios años para determinar cual es el punto de equilibrio de la cueva ante un régimen de visitas, ya que en la actualidad está en un estado de equilibrio inestable por la ruptura de los mecanismos de intercambio de energía naturales.

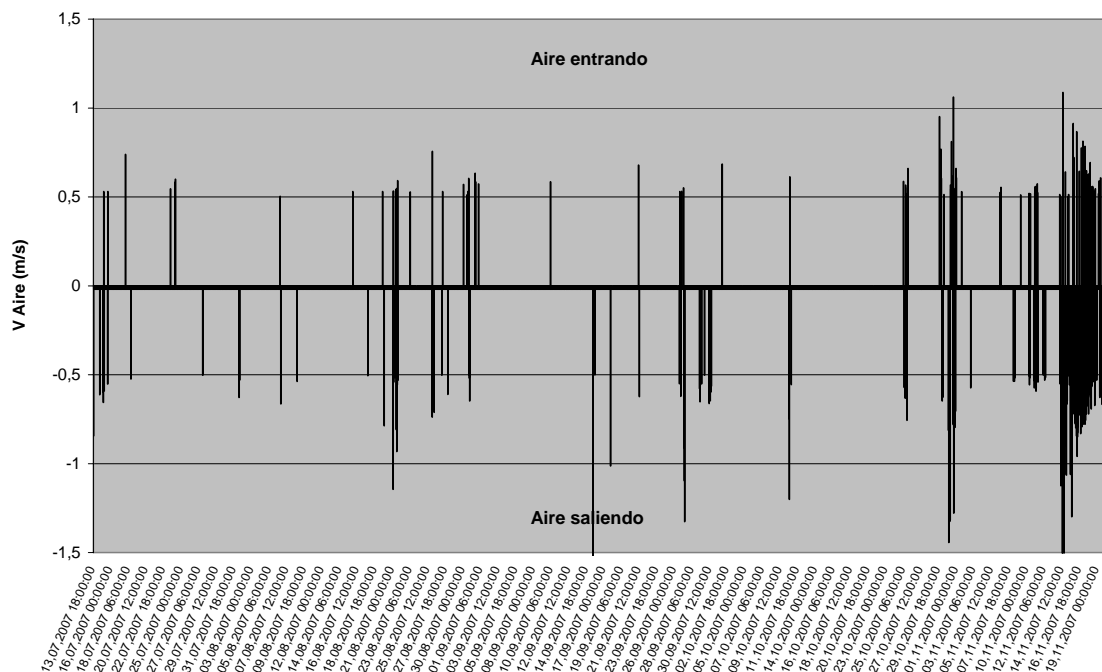
### 3.5. Corrientes de aire.

Con la colocación de un anemómetro de ultrasonidos en la galería de Acceso, se determina no solo la velocidad del aire, también nos señala su dirección. Estos parámetros son muy importantes a la hora de estudiar los mecanismos de intercambio de masa.

Este equipo fue colocado en el mes de julio, siendo un periodo muy corto para emitir conclusiones, ya que no se contempla el año completo. En este trabajo solo se mencionarán algunas relaciones estadísticas con el resto de las variables y algunos cálculos preliminares del volumen de aire intercambiado por este concepto.

Hasta el momento no se aprecia un comportamiento cíclico en la curva obtenida (figura 44). Existen periodos de alta densidad de registros y otros en los que parece estar en total calma el aire de la galería.

El mecanismo que explica el movimiento de las masas de aire en la cueva, depende de dos factores fundamentalmente, el gradiente de la densidad de los gases y las variaciones de la presión atmosférica (Montoriol 1958, Eraso 1969, Llopis Lladó 1970, Andrieux 1972, entre otros). Otros autores explican el intercambio de masa y energía por el balance de entalpía (García 1985, Otero 1994, 1995, 2000, 2005, 2006) y entropía (Otero 1994, 1995, 2000, 2005, 2006).



**Figura 44.** Comportamiento de la velocidad y dirección del aire en la galería de Acceso.

A partir de los resultados obtenidos en la cueva Mendukilo, se confeccionó una matriz de correlación, donde intervienen las principales variables medidas y calculadas, relacionándolas con la velocidad del aire (Tabla XVII). El gradiente de las variables fue

calculado entre el interior de la cueva y la estación de Entrada y en interior de la cueva y el exterior.

|              |         |
|--------------|---------|
|              | V Aire  |
| Dif T Ent    | -0,3383 |
| Dif S Ent    | -0,3376 |
| Dif H Ent    | -0,3248 |
| Dif Pv Ent   | -0,3125 |
| Dif HAbs Ent | -0,3122 |
| Dif H Ext    | -0,2745 |
| Dif Pv Ext   | -0,2678 |
| Dif HAbs Ext | -0,2676 |
| Dif CO2 Ext  | -0,2581 |
| Dif T Ext    | -0,2577 |
| Dif P Ent    | -0,2251 |
| Dif CO2 Ent  | -0,1556 |
| Dif S Ext    | -0,0567 |
| Dif Dens Ext | -0,0429 |
| Dif P Ext    | -0,0357 |
| Dif Dens Ent | 0,0098  |

*Tabla XVII. Matriz de correlación entre la velocidad del aire y diferentes variables. Dif = diferencia entre las estaciones interiores y la Entrada (Ent) o Exterior (Ext), Densi = densidad del aire, HAbs = humedad absoluta, P = presión atmosférica, Pv = presión de vapor, T = temperatura del aire, H = entalpía, S entropía, V Aire = velocidad del aire medida en la galería de Acceso.*

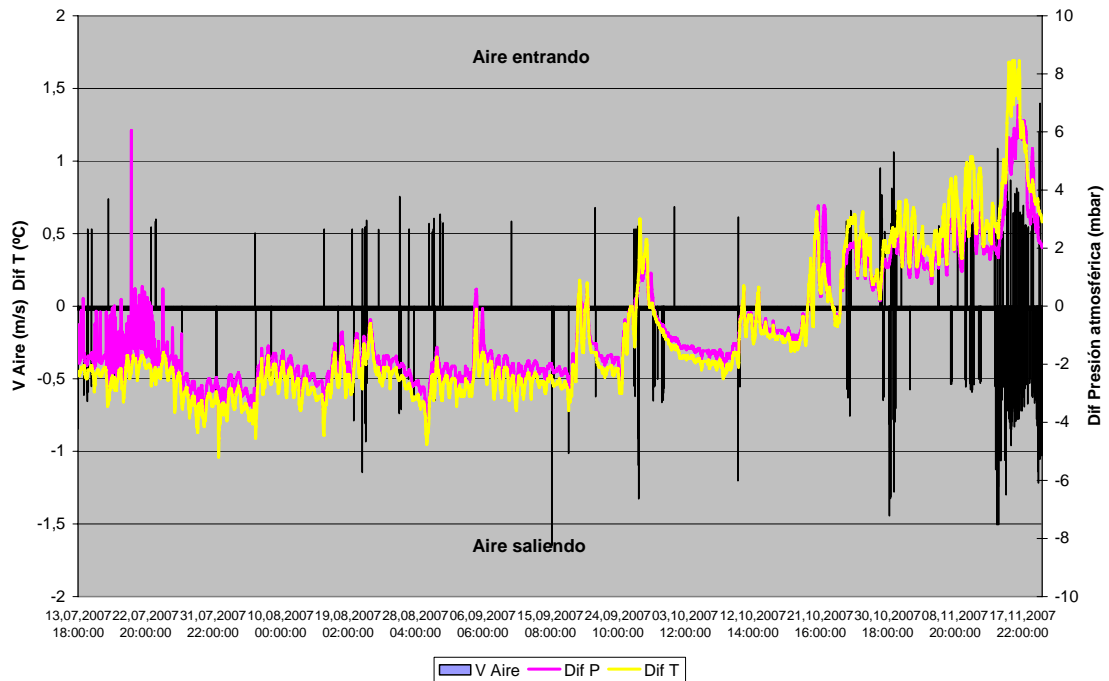
Las mejores correlaciones encontradas con la velocidad del aire son para la diferencia de temperatura, entropía, entalpía, presión de vapor y humedad absoluta. Todas entre el interior de la cueva y la estación Entrada. Respecto al sistema exterior la entalpía, la presión de vapor, la humedad absoluta y la concentración de CO<sub>2</sub> continúan en ese orden.

De estos resultados puede deducirse lo siguiente:

- El gradiente de densidad entre el interior y las estaciones y las variaciones de la presión atmosférica no explican, estadísticamente, el movimiento del aire en la cueva Mendukilo.
- Las variables de mejor correlación con la velocidad del aire son la temperatura, la entropía y la entalpía.
- Ninguna de las variables estudiadas explica de forma satisfactoria la generación de las corrientes de aire.
- La falta de correlación observada señala la presencia de al menos otra comunicación del interior de la cueva con el exterior o la sala de la Entrada.

La comunicación con la sala de la Entrada ya fue explicada en un trabajo anterior (Otero *et. al.* 2006), confirmándose su presencia con los resultados del análisis estadístico.

Tomando las cuatro primeras variables de la matriz de correlación (tabla XVII), es decir, las diferencias de temperatura, entropía, entalpía y humedad absoluta entre el interior de la cueva y la estación Entrada. La  $r^2 = 14,93$ , por lo que puede interpretarse que la variación de estos parámetros solo explican el 15 % del movimiento del aire en la galería de Acceso.



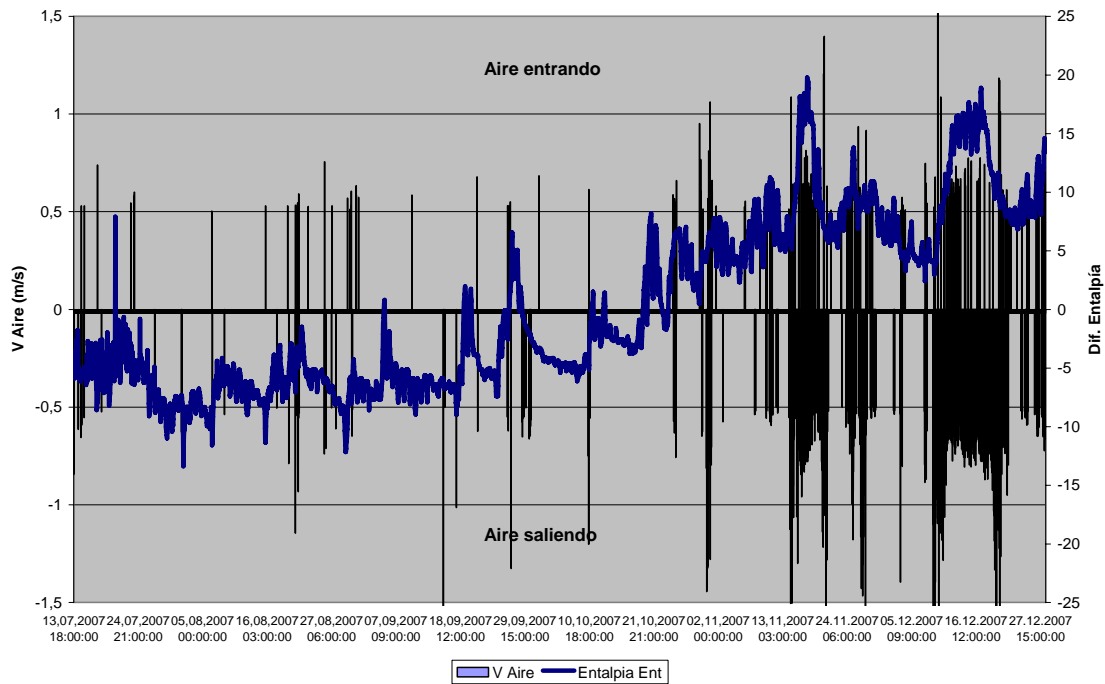
**Figura 45.** Comportamiento del movimiento del aire en relación con la diferencia de presión atmosférica y temperatura del aire entre las estaciones del interior y Entrada.

La correlación en general es mucho mejor entre el interior de la cueva y Entrada, que con el exterior. Éste fenómeno ocurre por la forma en que se desarrolla el mecanismo de transferencia de masa y energía de la cueva. La masa gaseosa se mueve por la galería de Acceso hacia Entrada. Al salir la sala, el gas sufre un proceso de expansión, que favorece una disminución de la temperatura y su densidad.

La morfología de la sala de Entrada permite la formación de dos corrientes de aire, una ascendente, hacia la salida, y otra que atraviesa toda la sala hasta la grieta que comunica con Herensugea.

La mezcla del aire que sale del interior con la masa de Entrada sufre una serie de transformaciones termodinámicas. Además de las provocadas por el incremento del volumen, van a originarse otras por la mezcla con un aire con diferentes patrones higrometeorológicos, dependiendo de la temperatura y la humedad de cada masa y el volumen de aire que salga de la cueva.

En las figuras 45 y 46 se aprecia el comportamiento de las diferencias de presión atmosférica, temperatura y entalpía, relacionadas con la velocidad y dirección del aire. Sólo en ciertos periodos coinciden los picos de los gráficos con la presencia de corrientes de are en la galería.



**Figura 46.** Relación de la diferencia de entalpía entre el interior de la cueva y la estación Entrada con la dirección y velocidad del aire.

| Meses      | Aire saliendo | Aire entrando | Relación |
|------------|---------------|---------------|----------|
| julio      | -73,83        | 47,62         | 1,55     |
| agosto     | -181,40       | 136,84        | 1,33     |
| septiembre | -183,79       | 38,84         | 4,73     |
| octubre    | -234,89       | 197,46        | 1,19     |
| noviembre  | -2.017,15     | 619,28        | 3,26     |
| diciembre  | -3.218,01     | 741,92        | 4,34     |
|            |               |               |          |
| Total      | -5.909,07     | 1.781,96      | 3,32     |

**Tabla XVIII.** Relación del caudal de aire que entra y sale de la cueva. Se asume que el tiempo de duración del flujo medido es un segundo.

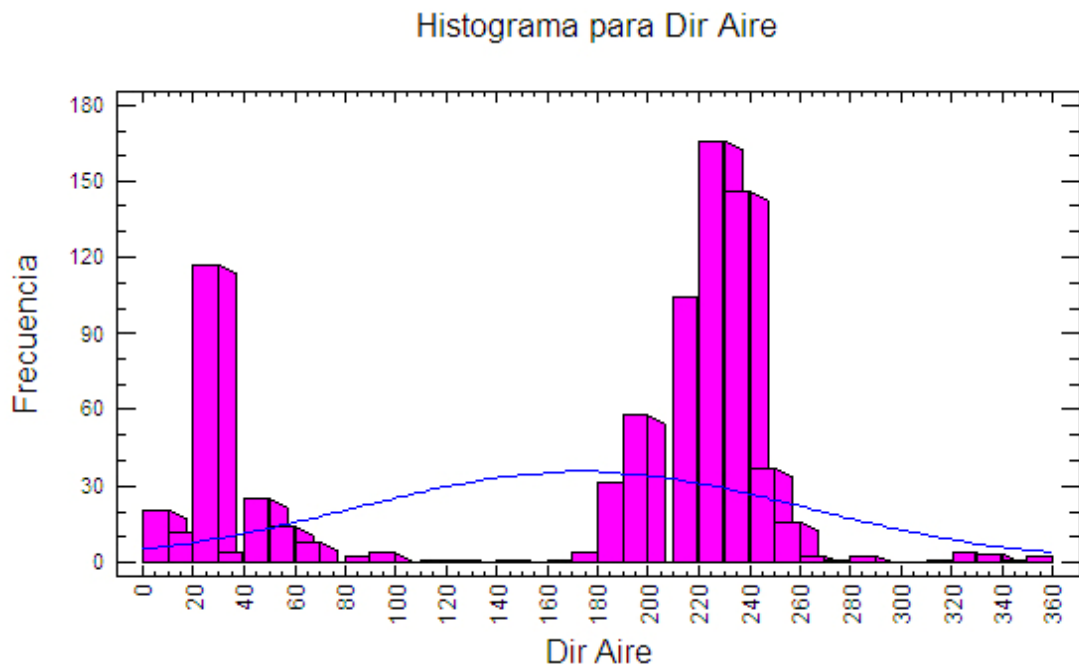
Una dificultad para cuantificar el volumen de aire que sale o entra es que no se precisa el tiempo de duración de la corriente de aire, pues las mediciones son horarias. En la tabla XVIII se relacionan los caudales instantáneos calculados, del aire que circula por la galería de Acceso.

Estos caudales fueron calculados a partir de la velocidad del aire medida y el área de la galería, para un segundo de duración. En la tabla se sumaron los caudales instantáneos para cada mes.

Hasta el momento se aprecia que siempre la cantidad de aire que sale es superior al volumen que entra, teniendo en cuenta sólo la velocidad del movimiento y no su duración. Si se tuviera en cuenta la duración de la corriente, el volumen de aire que sale

tendría un valor muy similar al volumen que entra, siempre que la única zona de intercambio fuera la galería de Acceso.

Otra característica ha sido que la frecuencia de veces del aire moviéndose hacia fuera a sido muy superior al aire entrando (figura 47). Aunque no se reporta un año completo de mediciones, resulta interesante la dirección que predomina, teniendo en cuenta que es precisamente en diciembre cuando se mueve un mayor volumen de aire y que la cantidad de aire que sale es más de cuatro veces superior a la que entra, cuando teóricamente debía ser a la inversa.



**Figura 47. Frecuencia de la dirección del aire en la galería Acceso.**

Se insiste que las valoraciones anteriores no son definitivas, pues no se tiene un registro completo de, al menos, un año.

## Conclusiones.

- El promedio anual de la temperatura disminuyó en la estación exterior en 1,4 °C en el año 2007 respecto al 2006. Este efecto sólo se manifestó en la estación Entrada, sin afectar a las estaciones más profundas, que mantuvieron, prácticamente, los mismos valores.
- Se confirma que el comportamiento de la temperatura es, en general, independiente del régimen de visitas. La masa humana sólo afecta a nivel local en la zona de la pasarela. El efecto acumulativo de calor observado es provocado por el mecanismo de circulación del aire en los sectores más profundos, en respuesta al ciclo térmico natural de la cueva.
- La presión atmosférica presentó un comportamiento totalmente diferente en ambos años, con mayor variabilidad en el 2007, probablemente por la inestabilidad del tiempo en este periodo.
- Por la disposición espacial de la sonda de CO<sub>2</sub> en la estación Laminosin, la concentración medida describe el tiempo de difusión desde la fuente (los visitantes) hacia el resto de la sala. En Herensugea este parámetro describe el efecto acumulativo y el tiempo de recuperación del sector.
- La atmósfera de la cueva se encuentra en una etapa de transición, reacomodando el mecanismo de difusión e intercambio de CO<sub>2</sub> con el exterior, adaptándose a las nuevas cargas generadas por los visitantes, modificando el equilibrio entre los diferentes sectores.
- La continuidad de las visitas favorece la generación de una corriente superior, cerca del techo de la cueva, más cálida, con mayor humedad y contenido de CO<sub>2</sub>, que pudiera provocar un proceso de condensación, desencadenando otros procesos como la decalcificación y la redisolución. Hasta el momento no hay evidencias que estos procesos existentes en Mendukilo, sean provocados por las visitas efectuadas, pues son anteriores a la apertura al público.
- La cueva presenta gran capacidad disipativa del calor, teniendo como agentes refrigerantes la roca y los depósitos de agua. Además, este proceso de disipación térmica está favorecido por la amplitud de las salas, que permite la reducción del gradiente térmico.
- El tipo de agua de los depósitos de Mendukilo es bicarbonatada cálcica, con un claro predominio de ambos iones sobre el resto de los macroelementos determinados.
- Partiendo de los resultados obtenidos en los análisis químicos de las aguas, se concluye que el régimen de visitas actual en la cueva, no ha afectado el equilibrio químico en los depósitos de la cueva.

## **Recomendaciones.**

El régimen de explotación diseñado en la cueva Mendukilo, ha logrado minimizar el impacto ambiental que provocan las visitas masivas. Con la ubicación de nuevos tramos de pasarela, en la zona de de Herensugea y debido a que se trata de una zona con grandes afloramientos litogénicos, y con el fin de poder determinar el mecanismo general de circulación en la cueva, se hace necesario la colocación de una nueva estación climática en la sala de Herensugea además de la ya recomendada en la sala del Guerrero, con sondas para la medición de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y CO<sub>2</sub> en el aire.