

Estudio del microclima de la cueva Pozalagua. Bizkaia. Período de medición 2004-2008.

Vladimir Otero Collazo* vlado62082@yahoo.es

Jabier Les Ortiz de Pinedo* jabierles@sociedadalfonsoantxia.org

Rakel Malanda Ruiz* rakelcvmate@mixmail.com

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

Introducción.

Los estudios climáticos realizados a lo largo de cuatro años en la cueva de Pozalagua, Bizkaia, han permitido conocer y validar el mecanismo de intercambio de masa y energía con el sistema exterior, comparando el comportamiento de las variables hidrometeorológicas con el régimen de visitas a la cavidad, la respuesta de la atmósfera hipogea a los cambios realizados en la cueva, como el cierre de grietas que comunicaban con el exterior, además de servir como un medio de control del estado ambiental de la atmósfera cavernaria.

Durante el primer año se recomendó limitar las visitas a valores inferiores a las 80 personas simultáneas dentro de la cavidad, cumpliéndose durante el periodo de mediciones, observándose en los resultados una mejora del comportamiento de los parámetros medidos, acercándose éstos al ciclo natural, aun en fechas de gran afluencia de público como el período de Semana Santa.

En el tercer y cuarto año se mantuvo el mismo régimen de visitas que en el segundo, comparando las fluctuaciones, tanto de la afluencia de público como de la variación de la temperatura y demás parámetros climáticos medidos y/o calculados.

Cumpliendo una de las recomendaciones de la memoria anterior, se mantuvieron abiertas las ventanas del edificio y la puerta de la cueva, lo que ha favorecido el intercambio de la masa gaseosa de la cueva con el exterior, reflejándose, hasta el momento, un balance positivo para la cueva.

Algunas de las recomendaciones no se pudieron cumplir, por causas objetivas. Una de ellas fue la continuidad de la medición de las ondas sísmicas en la cueva, por la rotura del equipo. La otra fue la colecta de las aguas de condensación.

La forma óptima de mantener el atractivo de la cavidad y evitar su deterioro, es mediante el cumplimiento de ciertas normas establecidas en el régimen de visitas a la cavidad, las que sólo pueden ser dictadas después de un estudio profundo de las características microclimáticas de la cueva, el conocimiento de los mecanismos de transferencia de masa y energía entre los sistemas gaseosos, sólidos y líquidos y entre el sistema interior y exterior de la cavidad.

1. Materiales y Métodos.

Para la toma de datos se colocaron tres estaciones en el interior de la cavidad: en la Entrada, en la sala Versailles y en la sala Órgano y otra en el Exterior, justo en el tejado del edificio de la entrada, 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 CO₂. En la Tabla I se muestran las variables medidas por estaciones.

El número de visitas diarias así como el horario de entrada lo reportaron los guías de la cueva.

Los datos fueron tomados con equipos de registro continuo, con una frecuencia de una hora de forma simultánea en las cuatro estaciones antes mencionadas. Para el procesamiento estadístico se utilizó el paquete informático StatGraphics Plus 5 para Windows, en el mismo se calcularon diferentes índices como el histograma de frecuencia de los valores en cada parámetro, el coeficiente de regresión para determinar la relación existente entre cada variable en las diferentes estaciones y entre las diferentes variables medidas en la cueva y en casos necesarios la regresión entre una o varias variables para determinar la ecuación matemática.

Variable	Exterior	Entrada	Versalles	Órgano
Temperatura del aire	x	x	x	x
Temperatura del agua			x	x
Temperatura de la roca			x	
Humedad relativa	x	x	x	x
Presión atmosférica	x	x	x	x
Concentración de CO ₂	x	x	x	x
Conductividad eléctrica del agua			x	x
Concentración de Radón				x

Tabla I. Variables medidas por estaciones.

Los cálculos termodinámicos y de transferencia de masa y energía se realizaron a través del algoritmo Clima, desarrollado por Otero (1992), específicamente para trabajos en cuevas. Partiendo de los datos medidos en la cavidad, se introducen, para los cálculos básicos, la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y la concentración de CO₂ en el aire. En el algoritmo se calculan: temperatura de rocío, temperatura virtual, temperatura potencial, temperatura equivalente, humedad absoluta, volumen húmedo, presión saturante del vapor de agua en el aire, presión de vapor de agua en el aire, presión parcial del CO₂, densidad del aire, entalpía, entropía, trabajo realizado por la masa de aire, que puede ser calculado para una estación entre diferentes momentos o entre dos estaciones y calor cedido o absorbido, con la misma característica del trabajo.

Como cálculos adicionales se realizaron: transferencia de calor por convección entre dos masas gaseosas, coeficiente de difusión del CO₂ entre dos estaciones y el intercambio de calor con el exterior por la masa rocosa que cubre la cavidad.

LA CUEVA DE POZALAGUA (KARRANZA-BIZKAIA)

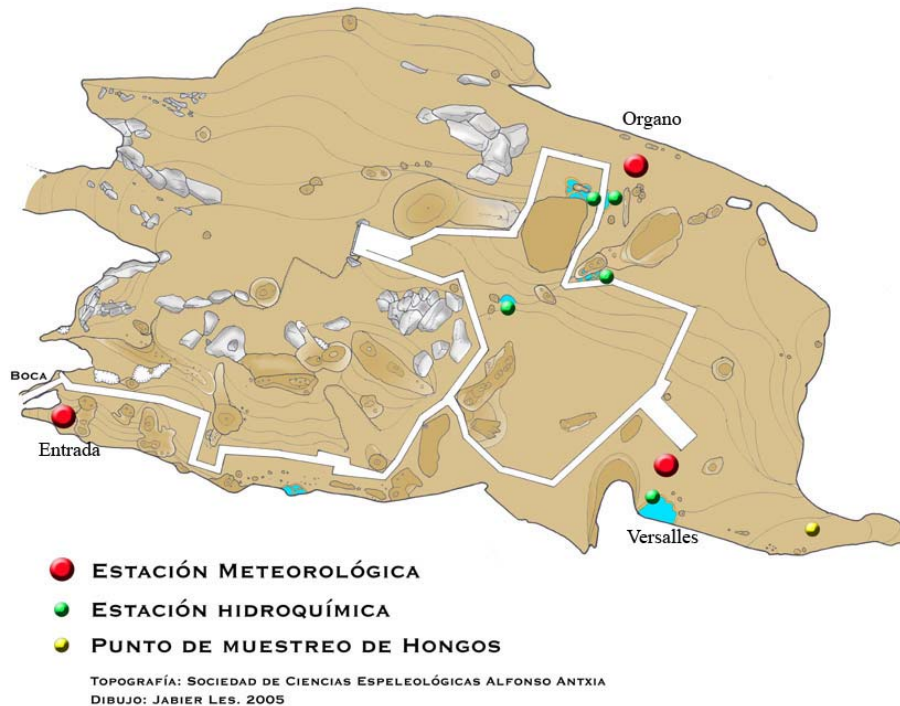


Fig. 1. Ubicación de las estaciones de medición de las variables hidrometeorológicas en la cueva y las zonas de muestreo de hongos. (mapa confeccionado por Jabier Les 2005)

1.1. Descripción de las variables calculadas.

La temperatura es uno de los parámetros fundamentales en la microclimática de cavidades, ya que su valor condiciona otras variables como la densidad del aire, la presión parcial de vapor de agua, la presión de saturación de vapor, la humedad relativa o el punto de rocío. Además, en relación con estas variables, la temperatura juega un papel fundamental en la circulación convectiva de masas de aire en la cavidad y en los fenómenos de condensación y evaporación del agua. Badino (1995) analiza la contribución de cada medio presente en la cavidad (aire, agua y roca) a la capacidad térmica del sistema termodinámico formado por la atmósfera de la cavidad (cantidad de calor que es necesario cederle para incrementar 1 °C su temperatura) y a la estabilidad de la temperatura, concluyendo que el agua es el medio más influyente en la estabilidad térmica de una cavidad. La capacidad térmica del agua es del orden de 4200 J/kg/ °C mientras que la del aire es de 1000 J/kg/ °C (Cortés 2004).

También es un índice del movimiento de las partículas que conforman la materia a la que se le mide este parámetro, por lo que tiene gran incidencia en multitud de procesos. Interviene de forma importante en el comportamiento de las reacciones químicas, determinando su velocidad y en muchos casos hasta la posibilidad o no

de ocurrencia de una reacción. Es, además, una forma *indirecta* de la medición del calor de un cuerpo.

En este caso se ha tenido en cuenta la influencia de la concentración del vapor de agua y del CO₂.

La densidad es uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta para determinar el posible movimiento de la masa gaseosa, pues contiene en sí tres parámetros fundamentales que favorecen el movimiento del aire, estos son: la presión, la concentración y el volumen. Este último de forma implícita en el concepto propio de la densidad de un material, que se describe como el inverso del volumen unitario.

Otras variables donde la temperatura ejerce una gran influencia son la entalpía y la entropía, las que describen la dirección de los procesos termodinámicos que tienen lugar en la atmósfera.

Para la determinación de los procesos corrosivos en la roca, además de la concentración de CO₂ es necesaria la presencia de agua sobre la misma. Ella sólo puede llegar por dos vías: la infiltración a través del agrietamiento del macizo o la condensación del vapor de agua.

Para controlar cuando existen mayores probabilidades de que ocurra el proceso de condensación, se calcula la temperatura de rocío (Tr), parámetro que define la temperatura a la que comienza la deposición del agua gaseosa en forma líquida.

El tomar como referencia un sistema saturado como ocurre en la cueva de Pozalagua, es decir, Hr = 100 %, implica que la presión saturante es igual a la presión de vapor de agua. Al disminuir la temperatura, sin la influencia de una masa de aire o cualquier otra acción que contribuya al desecamiento del aire, la presión saturante (Ps) va a disminuir su valor, haciéndose inferior al de la presión de vapor, produciéndose así una sobresaturación del aire. Por concepto la presión saturante es la máxima presión que puede ejercer el vapor de agua a una temperatura dada. Debido a esta situación el vapor sobrante se convierte en agua, teniendo lugar el proceso de condensación.

Con la entrada de grandes grupos de personas, la masa corporal de las mismas transfiere al medio una carga de calorías que tienden a favorecer el incremento de la temperatura del medio. Pero, junto a esa carga térmica, la fuente de calor emana además una cierta cantidad de vapor de agua por el proceso de transpiración, ya sea a través de la piel o del aire exhalado en la respiración, que compensa la concentración del vapor en la atmósfera, contribuyendo incluso al proceso de condensación por sobresaturación.

2. Clima de la cavidad.

2.1 Comportamiento de la temperatura.

La temperatura es una de las variables principales a tomar en cuenta en cualquier estudio de impacto ambiental. Su influencia sobre los procesos químicos y físicos que tienen lugar en el sistema, le confieren una importancia primordial.

El fenómeno de calentamiento global que se manifiesta en el planeta, no implica un incremento anual continuo de la temperatura. Este periodo intermedio se caracteriza por los cambios bruscos del comportamiento de este parámetro, manifestando valores extremos, como inviernos muy fríos o veranos muy cálidos.

Esta aparente aleatoriedad responde a una búsqueda del equilibrio en un sistema que está en constante cambio, recibiendo nuevos estímulos, tanto del exterior del planeta como de su superficie, en esta última se incluye la acción del hombre.

En el valle de Karranza también se manifiestan estos fenómenos globales. En la figura 2 se aprecia la variabilidad de los promedios mensuales en el exterior. La diferencia del recorrido anual entre la temperatura exterior y la del interior de la cueva, es manifiesta, existiendo una mayor inercia a los cambios en el interior de la cueva, aunque, a largo plazo, toda afectación al sistema exterior afectará al interior.

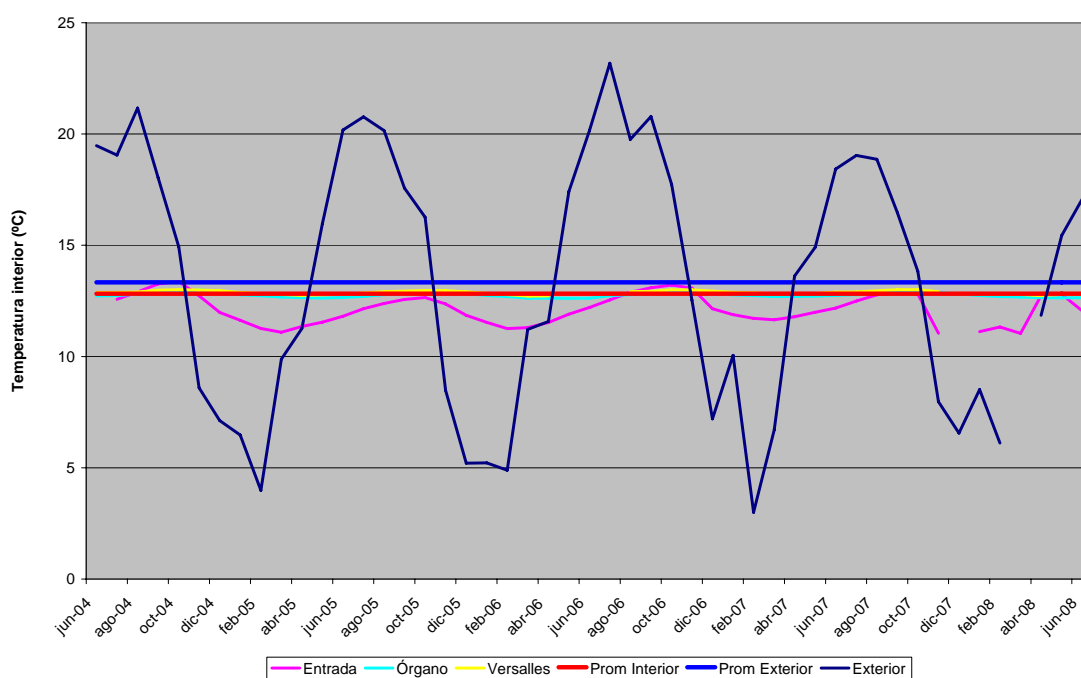


Fig. 2. Comportamiento de la temperatura media mensual en las diferentes estaciones en el período entre julio de 2004 y junio de 2008. Se aprecia la diferencia de los recorridos entre la estación del exterior y las ubicadas dentro de la cueva.

Los promedios anuales han manifestado cambios en el exterior de la cueva. Como se aprecia en la figura 3, el periodo 2006 – 2007 ha sido el más cálido de los últimos cuatro años, con un decremento en el 2007 – 2008, que representa el más frío.

En el interior de la cueva, el comportamiento de la temperatura es semejante al del sistema exterior, con un grado de amortiguamiento muy elevado. Un dato que diferencia el comportamiento de ambos sistemas es que el valor mínimo del promedio anual dentro de la cueva ocurre en el periodo 2005 – 2006, mientras que en el sistema epigeo fue en el periodo 2007 – 2008. Esto puede haber sido condicionado por el régimen de visitas, pues fue en el primer periodo mencionado que entró la menor cantidad de personas desde que se comenzó el monitoreo.



Figura 3. Comportamiento del promedio anual de la temperatura en el exterior y el interior de la cueva.

Este comportamiento de manifiesta en todas las estaciones del interior de la cueva.

	Exterior	Entrada	Órgano	Versalles	Visitas
2004-2005	13,05	12,13	12,78	12,88	39 199
2005-2006	13,24	11,98	12,73	12,86	35 889
2006-2007	13,99	12,35	12,77	12,90	37 799
2007-2008	12,88	12,10	12,76	12,86	40 977

Tabla II. Comportamiento de los promedios anuales en los periodos medidos. El promedio es calculado en el periodo de medición, es decir, entre julio de un año y junio del siguiente.

En Pozalagua el sistema interior de la cueva presenta particularidades morfológicas que favorecen la inercia del comportamiento de la temperatura respecto al sistema exterior:

1. La amplitud de la sala que conforma el mayor volumen de la cueva. La relación entre el volumen de la sala y el área de la comunicación con el exterior, hacen de la cueva un sistema cuasi aislado desde el punto de vista térmico. La

baja conductividad térmica del aire obliga a que la transferencia de calor sea por el mecanismo de convección, formando ligeras corrientes de aire de corto recorrido hasta la total disipación de la diferencia que la originó (Otero *et. al.* 2007).

2. Efecto refrigerante de la roca. La gran área de contacto entre la roca y la masa gaseosa, permiten un intercambio de calor entre los sistemas sólido y gaseoso, haciendo la roca el papel de un gran disipador, jugando un importante papel como termorregulador del sistema gaseoso subterráneo.

3. Procesos termodinámicos que tienen lugar en la cueva. Un predominio de los procesos endotérmicos en la cueva, favorecen que, en general, el promedio de la temperatura interior sea inferior a la del sistema exterior. Procesos como la litogénesis (García 1972) y el humedecimiento del aire que entra desde el exterior (Eraso 1965), favorecen la disminución de la temperatura en la cueva, cuando estos procesos se encuentran de forma generalizada.

4. Efecto térmico de los visitantes. Con la entrada de 80 personas de forma simultánea a la cueva, el volumen general estimado de la masa humana es de 17 m³. La sala de la cueva Pozalagua presenta un volumen aproximado de 166 000 m³ (Otero *et. al.* 2005). Aunque la diferencia de temperatura entre las personas y la masa gaseosa es cerca de 23 °C, el efecto disipador de la gran masa de aire y el efecto refrigerante de la roca y los procesos endotérmicos, reducen en gran medida la influencia humana. Solo con la entrada reiterada de estos grupos de forma continua, se aprecia un ligero efecto acumulativo del calor en la cueva, de poca duración. Un efecto importante que provocan los grupos de visitantes es la generación de microcorrientes convectivas de carácter local (Otero *et. al.* 2007).

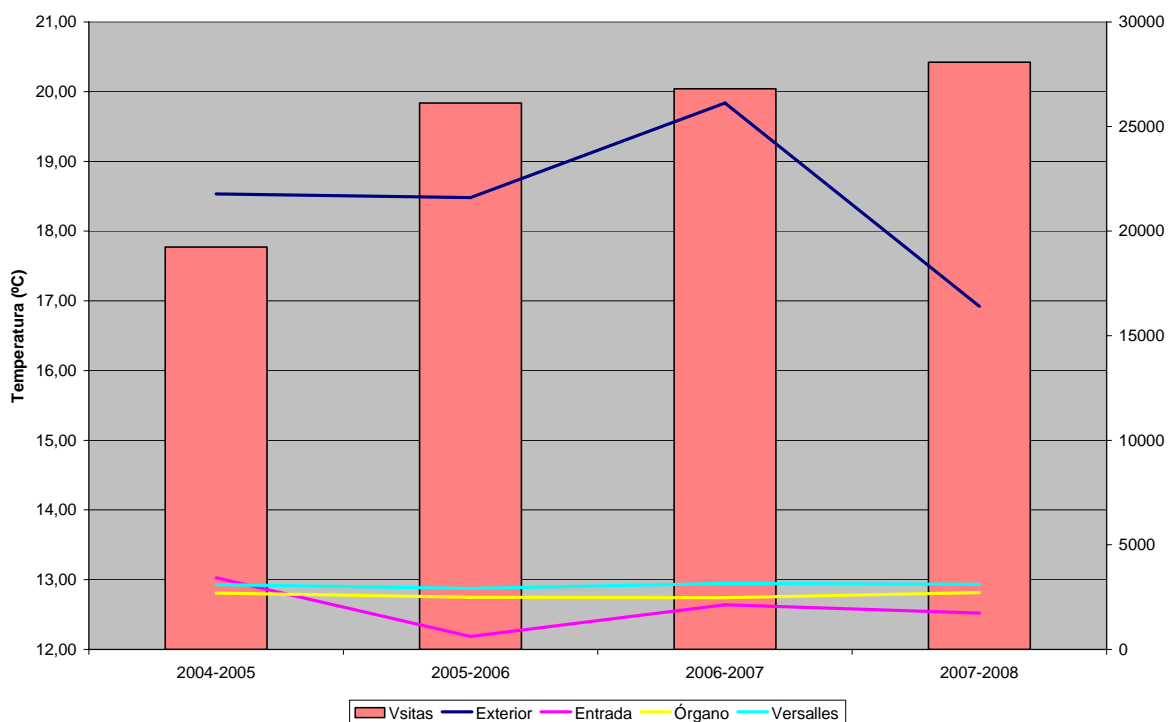


Figura 4. Comportamiento de la temperatura promedio en el periodo entre mayo y octubre, representando el periodo cálido.

En la estación Entrada predominan los procesos de clasificación y corrosión. Por su ubicación, muy cerca de la entrada y en la zona inferior, se le pronosticaba un comportamiento de la temperatura algo diferente, es decir, se esperaba que en los meses más cálidos, la temperatura fuera superior al resto de la cueva, mientras que en invierno fuera inferior.

	Exterior	Entrada	Órgano	Versalles
2004-2005	18,53	13,03	12,81	12,93
2005-2006	18,48	12,19	12,75	12,88
2006-2007	19,84	12,64	12,74	12,95
2007-2008	16,92	12,52	12,82	12,93

Tabla III. Comportamiento de la temperatura promedio en el periodo entre mayo y octubre, representando el periodo cálido.

El proceso de corrosión, exotérmico (García 1972), es una fuente de calor que, sumada al aire cálido que entra a la apertura de la puerta y la masa de visitantes, generaría suficiente energía para incrementar la temperatura de la zona muy por encima del resto de la cavidad.

En la figura 4 y la tabla II se muestra un comportamiento totalmente inverso. La temperatura promedio de la estación Entrada es inferior al resto de la cueva, aunque mantiene una cierta semejanza con el comportamiento de la curva en el exterior. Solo en el periodo 2004 – 2005 mantuvo el comportamiento esperado, el resto de los periodos estudiados el promedio de temperatura ha sido inferior al resto de la cueva.

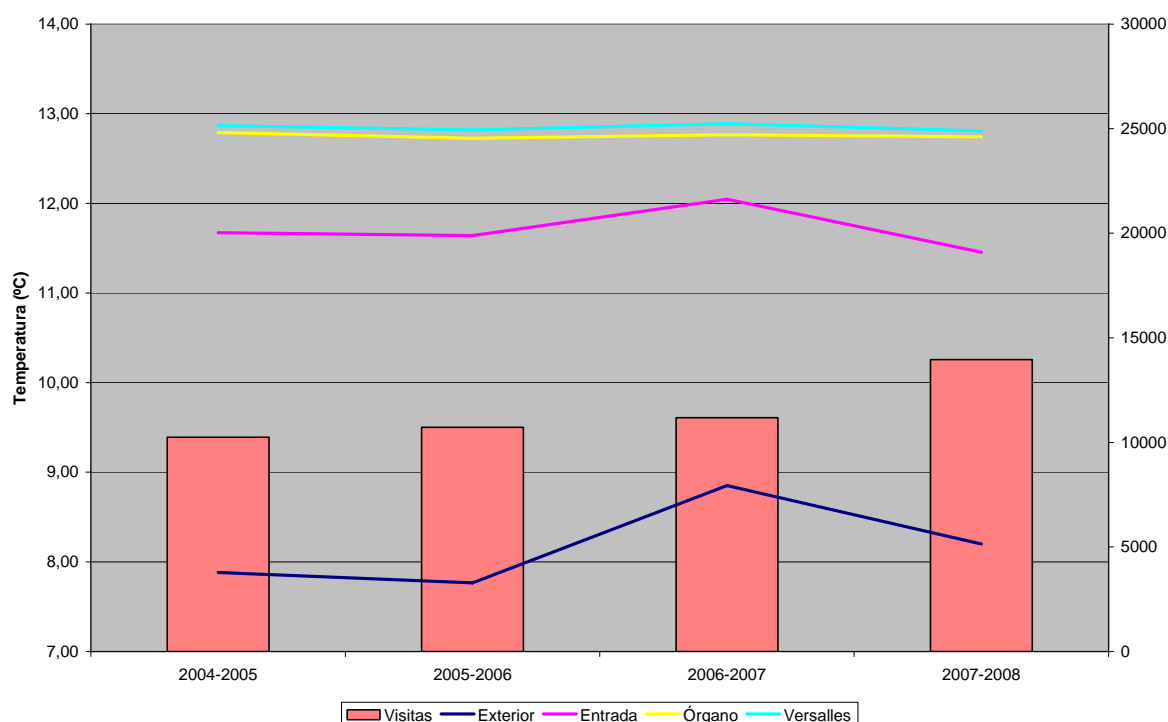


Figura 5. Comportamiento de las temperaturas promedio en la cueva y exterior y la cantidad de visitantes en la cueva en cada periodo durante los meses más fríos.

	Exterior	Entrada	Órgano	Versalles
2004-2005	7,88	11,67	12,79	12,87
2005-2006	7,76	11,64	12,73	12,82
2006-2007	8,85	12,04	12,77	12,89
2007-2008	8,20	11,46	12,74	12,81

Tabla IV. Comportamiento de las temperaturas promedio en la cueva y exterior y la cantidad de visitantes en la cueva en cada periodo durante los meses más fríos.

	Verano			
	Exterior	Entrada	Órgano	Versalles
2004-2005	2,31	0,36	0,08	0,06
2005-2006	2,15	0,44	0,10	0,08
2006-2007	2,12	0,52	0,11	0,04
2007-2008	2,21	0,37	0,08	0,07

Tabla V. Comportamiento de la desviación estándar en la cueva y exterior en cada periodo durante los meses más cálidos.

	Invierno			
	Exterior	Entrada	Órgano	Versalles
2004-2005	2,59	0,60	0,14	0,10
2005-2006	3,10	0,41	0,10	0,10
2006-2007	3,98	0,54	0,07	0,07
2007-2008	2,27	0,73	0,09	0,07

Tabla VI. Comportamiento de la desviación estándar en la cueva y exterior en cada periodo durante los meses más fríos.

En las figuras 4 y 5 se aprecia que el comportamiento de la temperatura, en la estación Entrada presenta una cierta independencia de los valores de las visitas. El análisis realizado en los periodos cálidos y fríos, muestran un número de visitantes similar al resto de los periodos, con un trazado de la curva similar al de la gráfica con los valores anuales.

El comportamiento de los promedios mensuales, apunta a un ligero incremento de la temperatura en la cueva, manifestando un cierto efecto térmico acumulativo, a partir del año 2006, cuando la temperatura promedio de la cavidad se había logrado reducir con la limitación a grupos de 80 personas simultáneas en la cueva.

Mantener las puertas y ventanas del edificio y la puerta de acceso a la cueva cerradas, con la adición del sellado de las grietas para estabilizar los alrededores del edificio, provocó que la cavidad funcionara como una trampa térmica, acumulando el calor, sin poderlo intercambiar con el exterior.

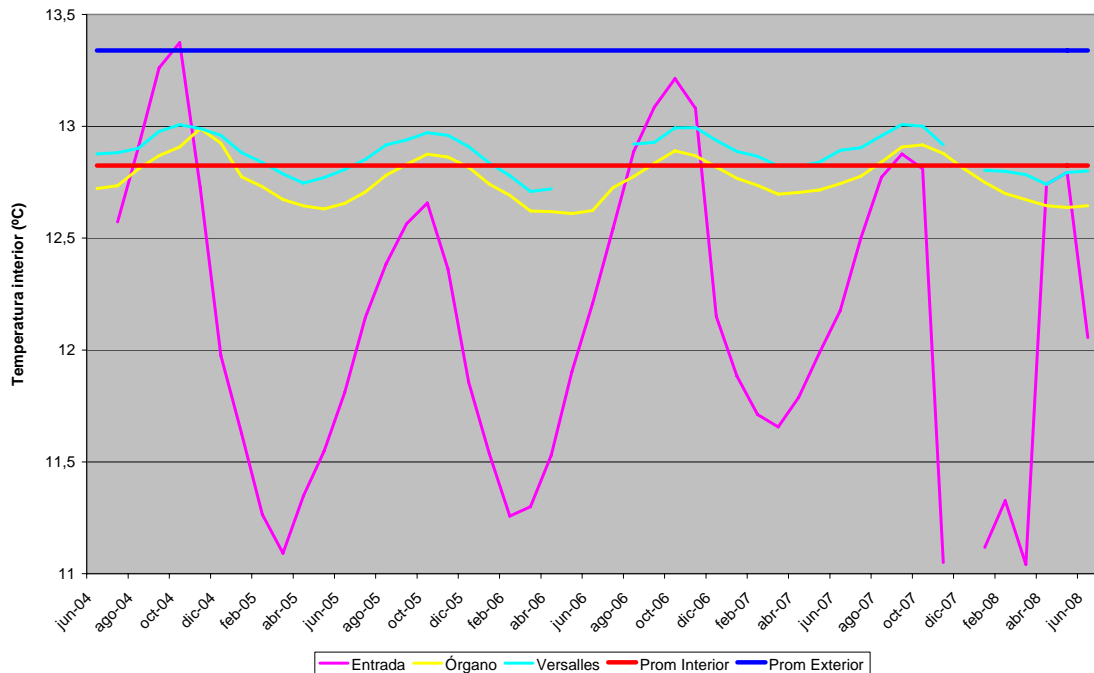


Figura 6. Comportamiento de la temperatura media mensual en el interior de la cueva en el periodo 2004 – 2008. Las temperaturas en el interior de la cueva se mantienen en un rango cercano al promedio anual de la temperatura en el exterior.

Desde septiembre de 2007, siguiendo la recomendaciones brindadas en la memoria anterior (Otero *et. al.* 2007) se han mantenido abiertas las ventanas del edificio y la puerta de la cueva. Esto evita el recalentamiento del aire en el interior de la edificación, por el efecto invernadero, favoreciendo el intercambio de la cavidad con el exterior.

Al mantener cerradas las ventanas y las puertas, el intercambio de masa de la cueva se limitaba solo a la masa de aire existente en el edificio. Al sobrecalentarse este, por el efecto de invernadero provocado por los cristales de las ventanas, favorece el incremento de la temperatura, reduciendo la saturación de la humedad. Al abrirse las puertas, entraba a la cueva un aire más cálido que el del exterior y con una menor humedad relativa. Al reaccionar con el aire del interior, con una temperatura muy inferior y saturado de humedad, el humedecimiento del aire entrante provoca un fuerte enfriamiento de la masa circundante, favoreciendo un estado de sobresaturación, que llega incluso a la condensación del vapor, y una reducción drástica de la temperatura del aire.

Todo este proceso es el responsable que, durante el verano, la zona de la entrada de la cueva sea la de menor temperatura

Atendiendo al comportamiento de la desviación estándar de la temperatura, teniendo en cuenta que este parámetro describe la dispersión de los datos alrededor del valor medio, se puede establecer la presencia de dos zonas en la cueva, como se muestra en la figura 7.

La primera zona es la cercana a la entrada de la cueva. Es el sector más inestable de la masa gaseosa hipogea, precisamente por ser el sector de intercambio entre la atmósfera subterránea y la exterior. El resto de la cueva mantiene una gran estabilidad térmica, aun con el efecto térmico que producen los grupos de visitantes.

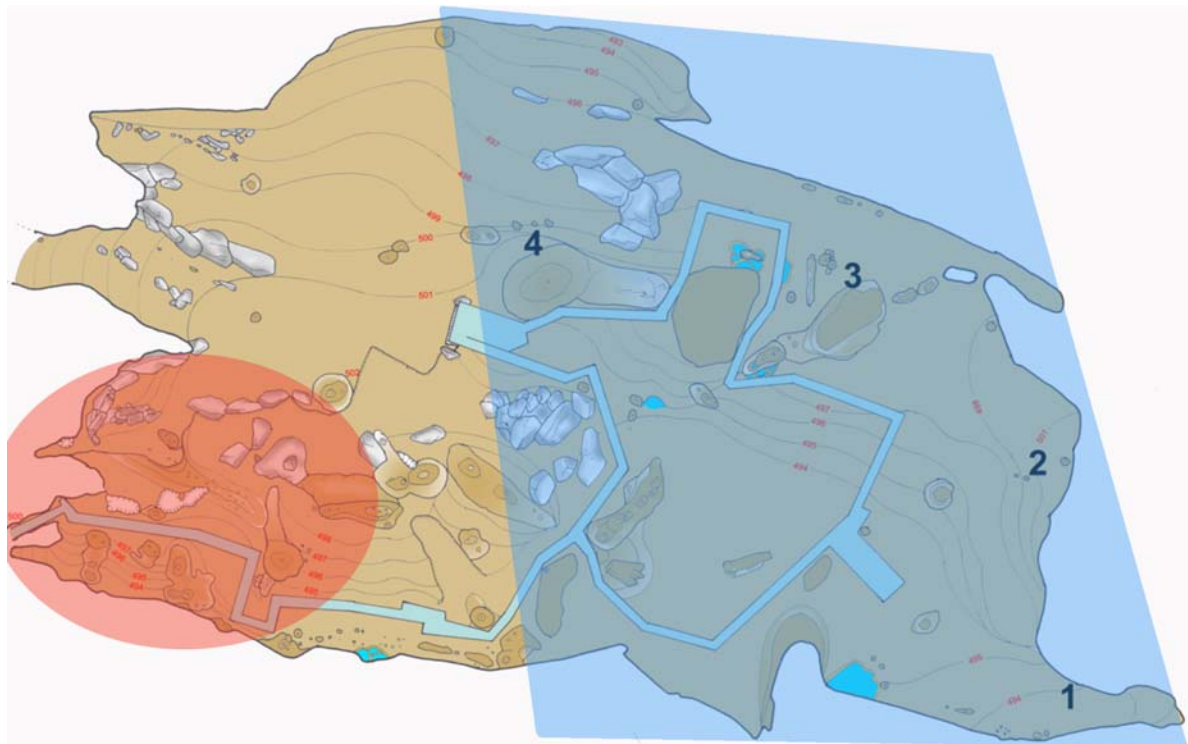


Figura 7. Comportamiento térmico en la atmósfera de Pozalagua. La zona coloreada en azul indica la zona más estable de la cueva, la zona coloreada en rojo indica la zona de intercambio de masa y energía con el exterior. El área restante es la frontera entre ambas zonas, conformando un sector de transición entre el equilibrio inestable de la Entrada y el equilibrio más estable de los sectores más profundos.

Como se menciona arriba, uno de los factores que modifican el comportamiento de la masa gaseosa de la cueva, es la relación volumen de la sala, área de intercambio en la entrada. Además que, de por si mismo, el volumen de la sala es un factor importante por la inercia que genera en el intercambio de masa y energía con el exterior.

Según los resultados de los promedios anuales y sus respectivas desviaciones estándares, la influencia del comportamiento de la atmósfera exterior sobre la del interior de la cueva, no se manifiesta en el mismo año, como se menciona en trabajos anteriores (Otero *et. al.* 2005, 2006 y 2007).

Hasta el momento, se aprecia un comportamiento cíclico de la temperatura hiperanual, tanto en los valores promedios de la temperatura, como en la desviación estándar, tomando éste último parámetro como un índice de la variabilidad de la muestra durante los diferentes periodos de estudio.

En la figura 8, donde se muestra el comportamiento de la desviación estándar anual, se aprecia el desplazamiento en el comportamiento de la estabilidad térmica de la atmósfera, al menos en un año, en la estación Entrada, respecto al exterior. En el caso de las estaciones más profundas, mantienen un régimen similar entre ellas, aunque la estación Versalles suele ser más estable que la estación Órgano. Respecto a la estación Entrada, se observa un desplazamiento en el comportamiento de las curvas, con un retardo de un año entre las estaciones más profundas y la parte anterior de la cueva.

Es decir, atendiendo a lo anteriormente reseñado, las zonas más profundas de la cueva responden al estímulo de la atmósfera exterior, con una inercia de, al menos, dos años. Todo lo anterior es referido a la inestabilidad térmica de la atmósfera, ya que el desplazamiento de la curva en las estaciones interiores si responde en el mismo año al estímulo del exterior.

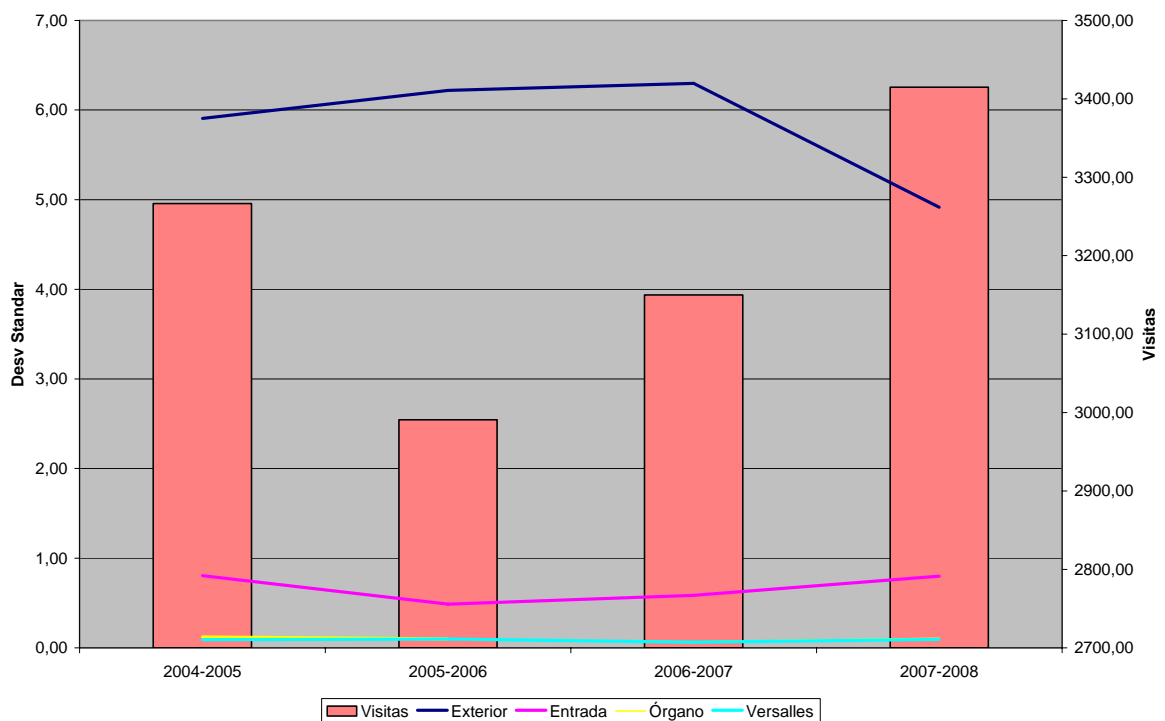


Figura 8. Comportamiento de la desviación estándar anual.

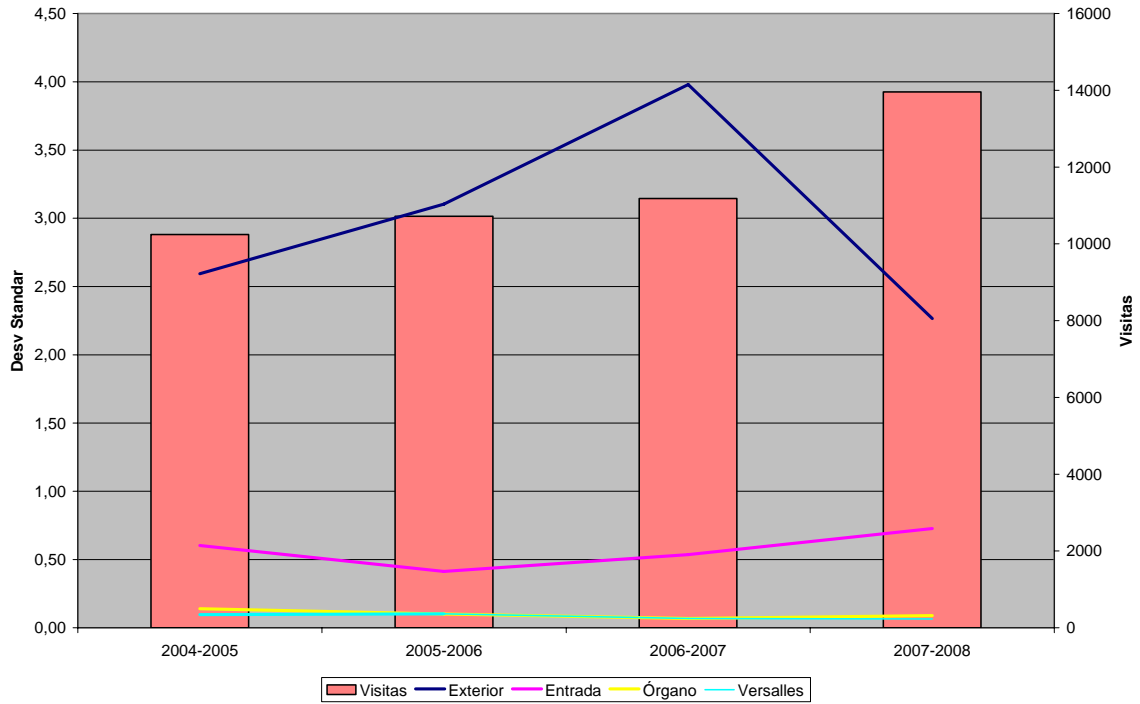


Figura 9. Comportamiento de la desviación estándar de la temperatura en las estaciones de interior y exterior de la cueva, durante los meses fríos.

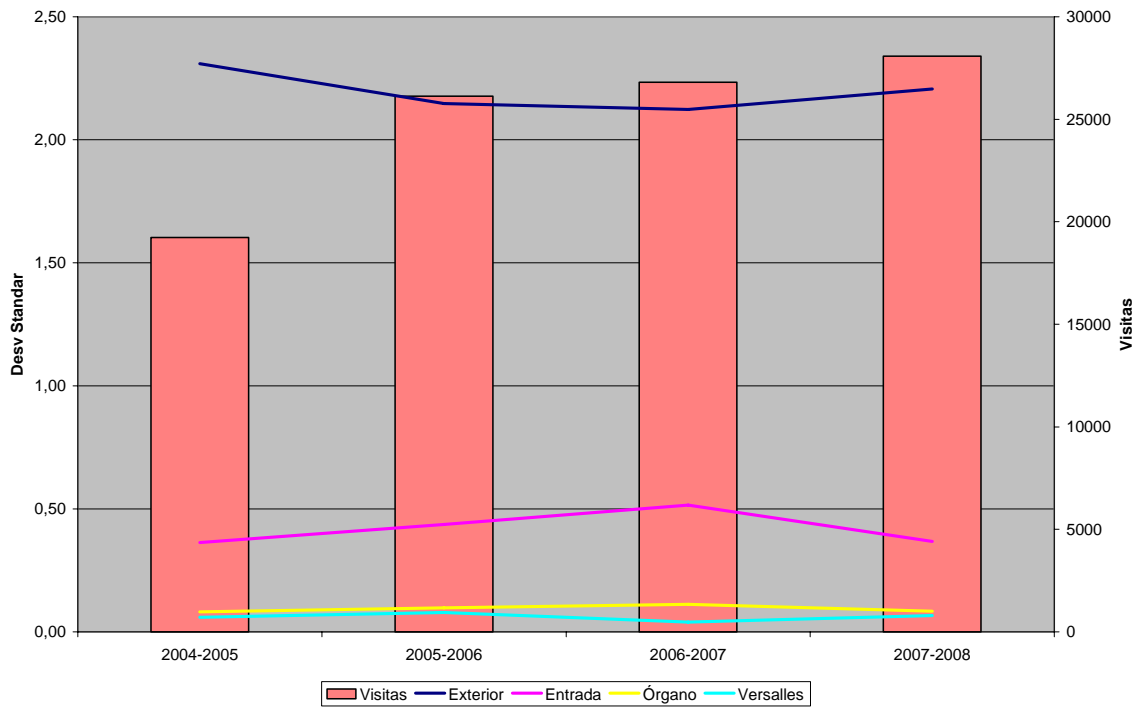


Figura 10. Comportamiento de la desviación estándar de la temperatura en las estaciones de interior y exterior de la cueva, durante los meses cálidos.

Como se aprecia en las figuras 9 y 10, la atmósfera tiene un comportamiento térmico más estable durante los meses cálidos. La desviación estándar en los meses fríos es casi el doble que en el resto del año. El comportamiento de la desviación estándar en las estaciones es similar al comportamiento de este

La influencia a corto plazo ha sido estudiada en los años anteriores (Otero *et. al.* 2005, 2006 y 2007).

Dando continuidad a estos estudios, se muestra el comportamiento de la temperatura del aire durante el periodo de Semana Santa, cuando, después de cierto tiempo de baja afluencia de público, tiene lugar los máximos diarios de visitantes en la cueva.

Una característica es que, los continuos cambios existentes en la cueva, como el cierre con una puerta de cristales además de la puerta de hierro existente en la entrada, el cierre de las grietas de respiración en los alrededores del edificio, la reventilación de la cueva al mantener las ventanas del edificio abiertas y la puerta de la cueva, han mantenido en constante cambio el comportamiento de la masa gaseosa.

En la estación Entrada es el único punto donde se han registrado, dentro de la cueva, variaciones de más de un grado. Precisamente por su relación con la atmósfera del edificio, donde la gran concentración de personas en un recinto cerrado, permite una cierta acumulación de calor que se transmite hacia el interior de la cueva, con un aire saturado de humedad (figura 11).

En las estaciones Órgano y Versailles, la estabilidad térmica de la masa gaseosa se mantiene, con variaciones, por la entrada de los grupos de visitantes, de menos de un grado, mostrando un cierto efecto acumulativo térmico, de corta duración, con una rápida recuperación de la temperatura original.

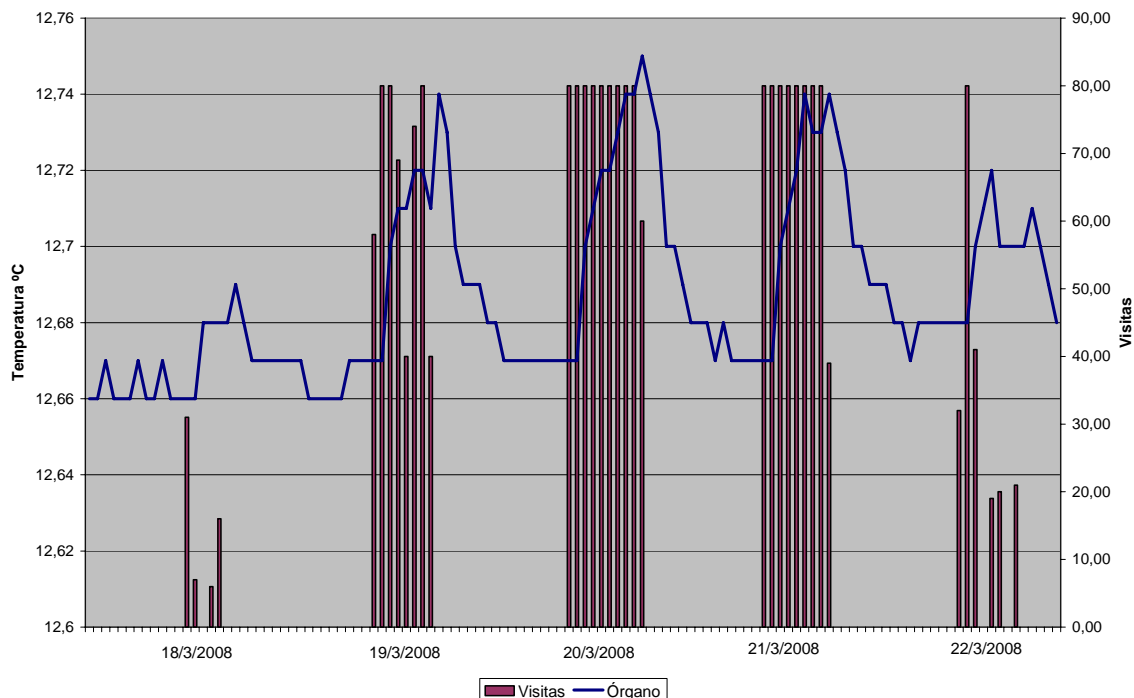


Figura 12. Comportamiento de la temperatura durante la Semana Santa de 2008 en la estación Órgano.

En la estación Órgano la recuperación de la temperatura tuvo lugar en 8 horas el primer día, 9 horas el segundo y 10 horas el tercer día (figura 12). De estos resultados se deduce un cierto efecto acumulativo térmico, de corta duración, que

se manifiesta sólo en los grandes grupos de visitantes, que mantienen un ciclo corto de visitas a la cueva.

La rápida recuperación de la cueva se debe a un efecto de disipación que contrarresta el efecto acumulativo, manteniendo el equilibrio térmico en la atmósfera hipogea. Este efecto es propiciado por el gran volumen de la sala y el intercambio de energía con la roca.

Como se aprecia en la figura 13, la temperatura promedio mensual de la roca es inferior a la temperatura promedio mensual del aire, aunque presenta oscilaciones parecidas, estas son algo más amortiguadas. Es precisamente por la baja capacidad de transmisión de calor de la roca, que tarda más tiempo en ceder calor al resto de la masa sólida.

Analizando el comportamiento de ambas temperaturas durante el periodo de Semana Santa del año 2008, se observa un cierto ciclo de incremento decremento de los valores en ambos parámetros (figura 14). En dicho gráfico se aprecia que el valor de la temperatura de la roca es superior a la del aire, invirtiéndose este fenómeno en el tiempo que se presenta y mantiene la anomalía térmica, generada por los visitantes en la cueva.

Es este fenómeno el que favorece que la temperatura del aire incremente su temperatura en los periodos de alta densidad de visitantes, permitiendo el descenso en un pequeño rango, hasta que se equilibra con la temperatura de la roca, generando el efecto acumulativo térmico. En este caso, la disipación del calor se produce en el mismo aire de la cueva, gracias al volumen de la sala, que no alcanza el equilibrio hasta pasado cierto tiempo, generando microcorrientes convectivas hacia las zonas no transitadas por los visitantes.

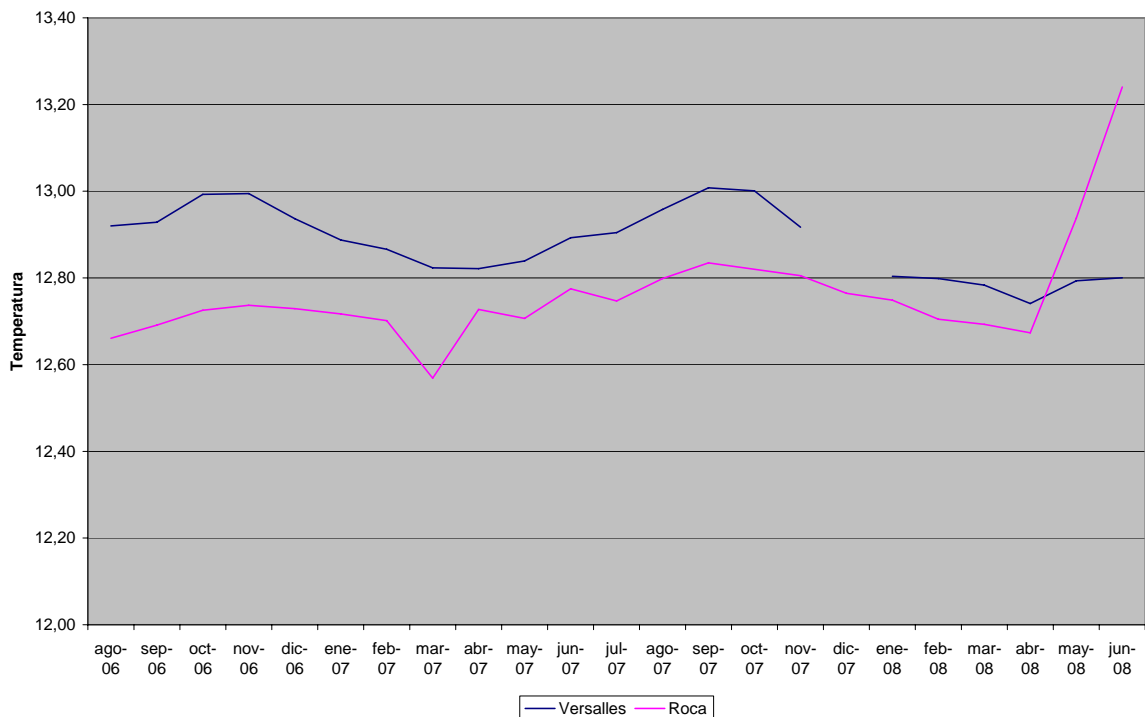


Figura 13. Comportamiento de la temperatura de la roca y del aire en la estación Versalles, desde agosto de 2006 hasta junio de 2008.

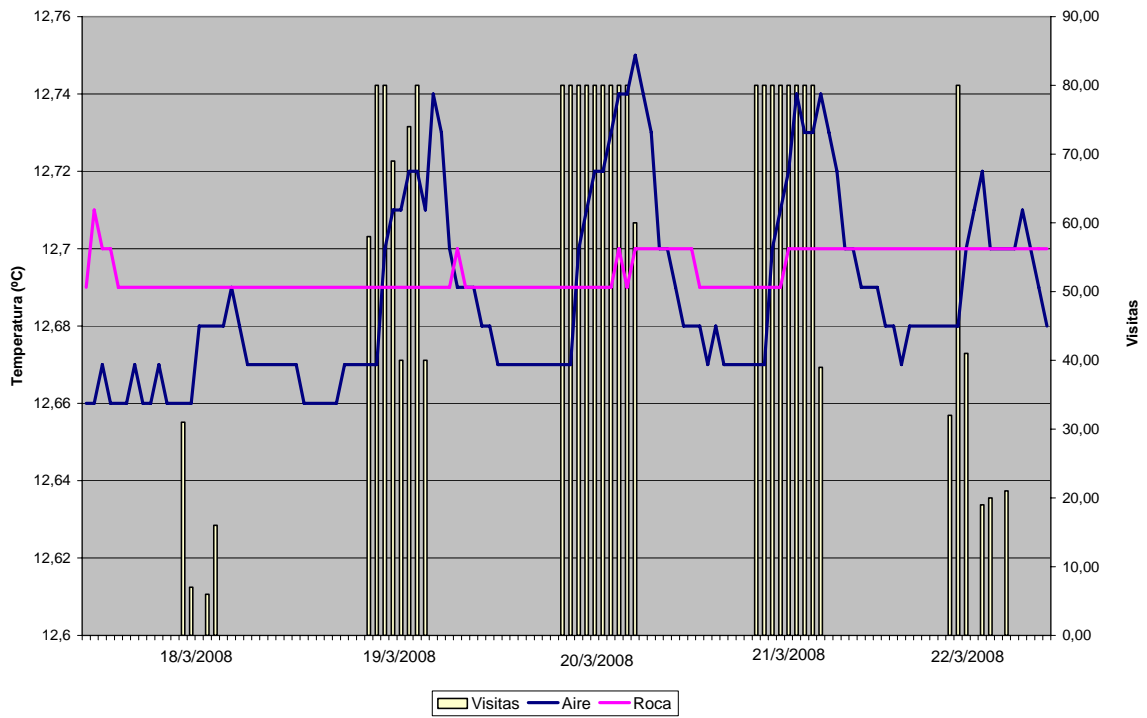


Figura 14. Comportamiento de la temperatura de la roca y del aire en la estación Órgano, durante la Semana Santa de 2008.

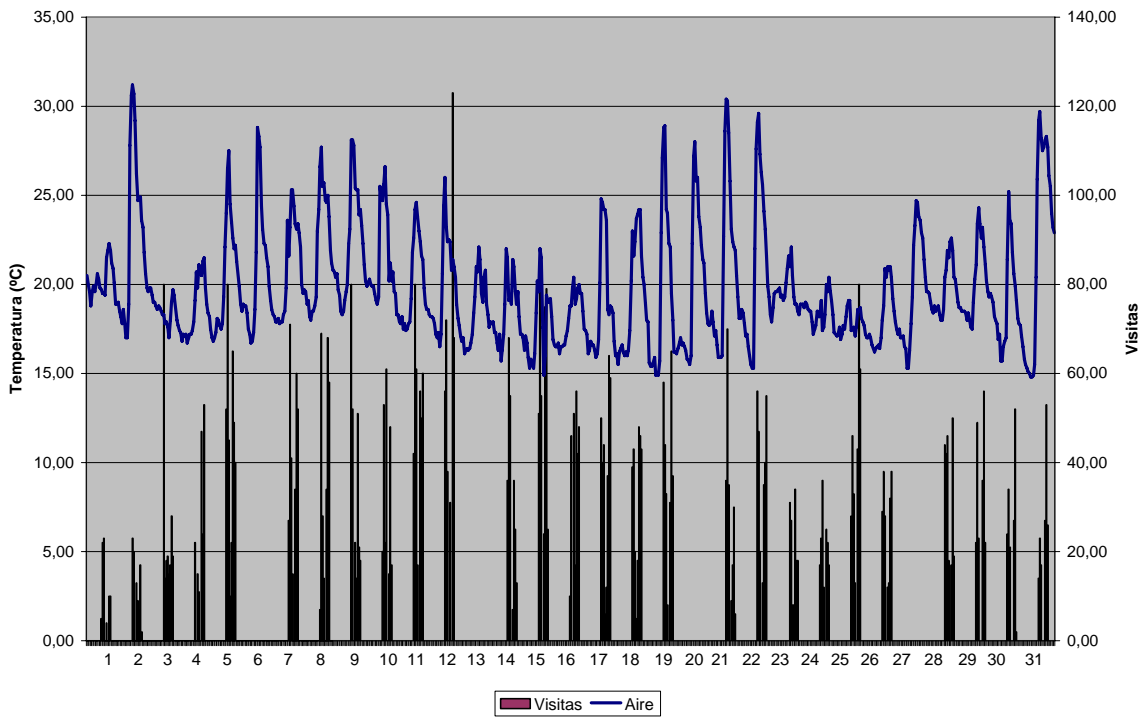


Figura 15. Comportamiento de la temperatura durante el mes de agosto de 2006 en la estación Exterior.

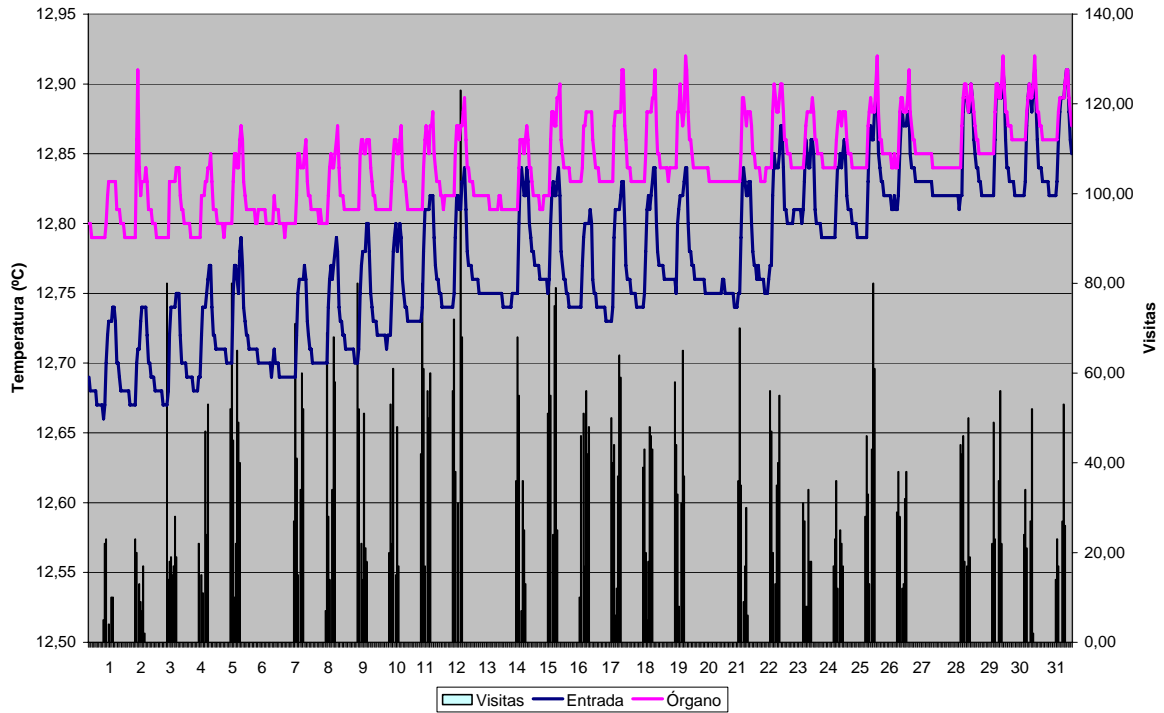


Figura 16. Comportamiento de la temperatura durante el mes de agosto de 2007 en las estaciones Entrada y Órgano.

El mes de agosto presenta el mayor número de visitantes en el año. La regularidad de las visitas, conjugado con el alto número de personas, favorecen un incremento más acentuado de la temperatura en el interior de la cueva.

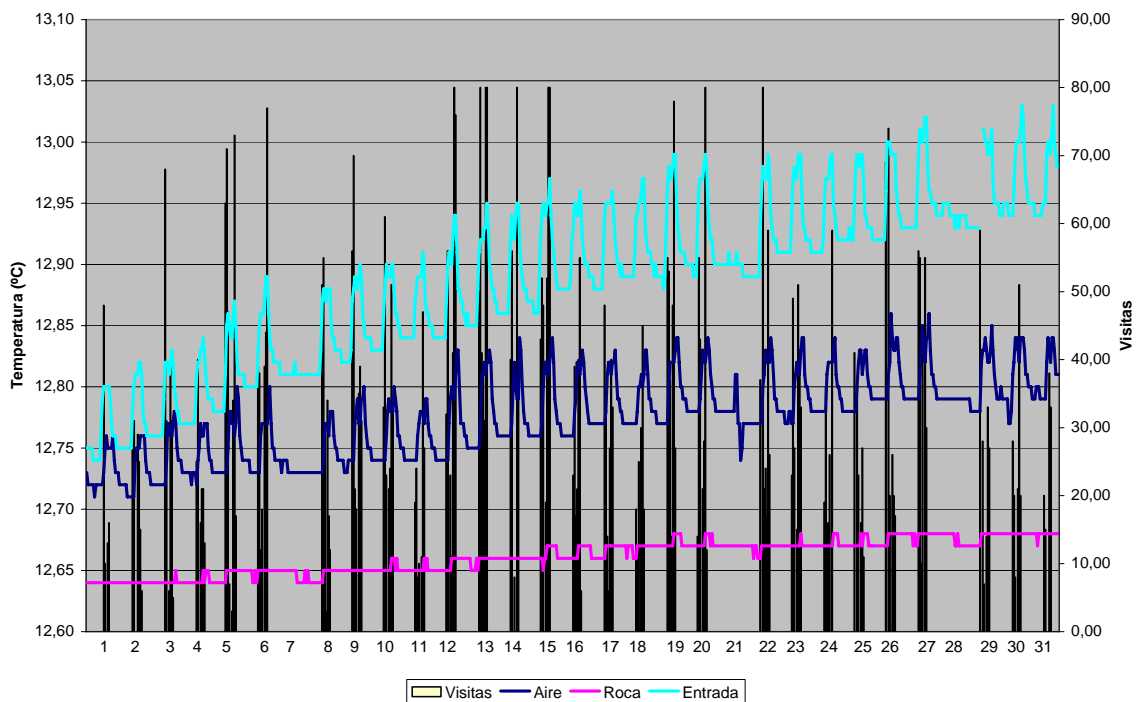


Figura 17. Comportamiento de la temperatura del aire y la roca en las estaciones Órgano y Entrada en agosto de 2006.

Como se aprecia en las figuras 16 y 17, la temperatura del aire presenta un incremento de su valor en el tiempo. El efecto combinado de la temperatura exterior y el número de visitantes, con un comportamiento más estable respecto a la cantidad de personas que visitan a diario la cueva, favorecen un incremento de la temperatura sostenido, con un pronunciado efecto de acumulación térmica, tanto en el aire como en la roca.

La diferencia promedio entre la temperatura del aire y de la roca es de sólo 0,11 °C, con valores máximos de 0,18 °C.

Al aplicar la teoría del Nomograma Para el Cálculo Climático propuesto por (Eraso 1965), se calcula la diferencia de entalpía de la atmósfera del interior de la cueva con la del exterior. Denominando, para mantener la simbología dada por el autor, S como el valor de la entalpía del exterior y K como el valor de la entalpía del interior, se obtiene que, para el 1 de agosto de 2006, $S = 67,12$ KJ y $K = 45,25$ KJ.

Según el trabajo de referencia, cuando $K > S$, se produce un efecto de enfriamiento por humedecimiento del aire que entra. En el caso analizado (1 de agosto de 2006), $K < S$, por lo que no se produce un enfriamiento, mas bien tiende a calentarse el aire de la zona de la entrada, lo que explica los valores observados en las estaciones (tabla VII).

Al estudiar el comportamiento de la entalpía en las estaciones Exterior y Órgano, se aprecia que, sólo en el periodo de invierno, la entalpía del sistema epigeo es, de forma generalizada, inferior a la entalpía del interior de la cueva (figura 18). Es decir, es solo en invierno cuando se produce un enfriamiento del aire por la mezcla de las masas gaseosas de ambos sistemas.

Estación	T °C
Exterior	19,50
Entrada	12,79
Órgano	12,72

Tabla VII. Valores de la temperatura del aire en las estaciones Exterior, Entrada y Órgano. Se aprecia que en Entrada la temperatura es ligeramente superior que en el resto de la cueva. Mediciones realizadas el 1 de agosto de 2006.

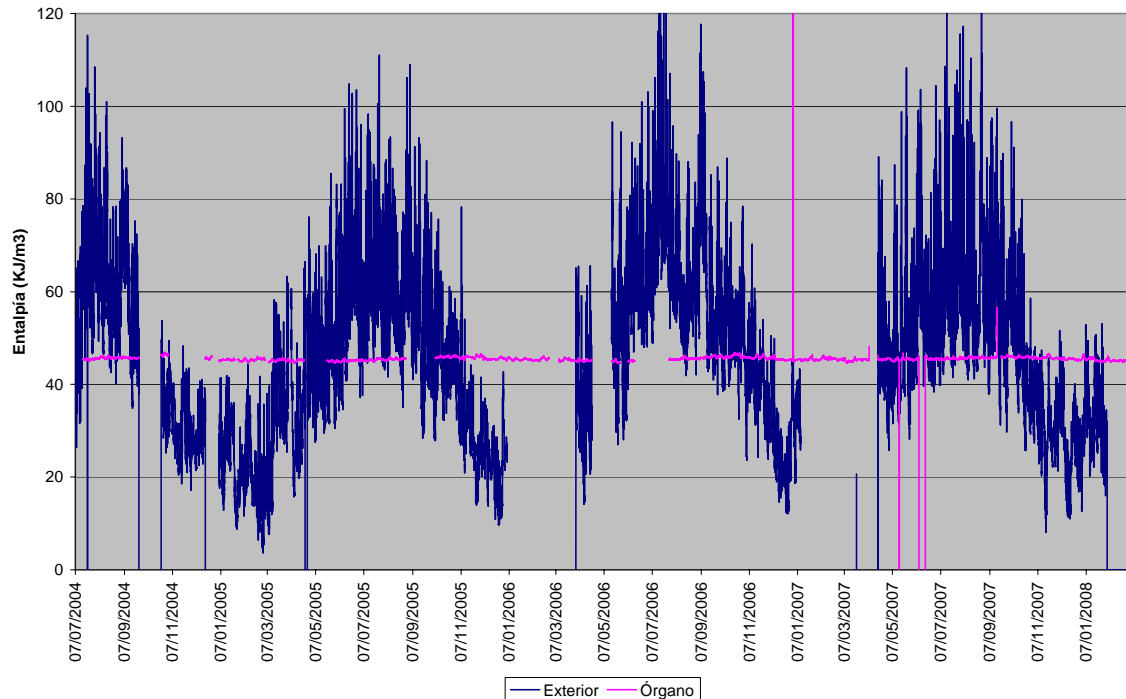


Figura 18. Diferencia entre la entalpía de la estación Exterior y la estación Órgano.

Al realizar los cálculos durante el mes de marzo, periodo más frío dentro de la cueva, el valor de $K = 45,38$ KJ, mientras que $S = 5,53$. Del resultado, $K > S$, se infiere que hay un enfriamiento en la zona de mezcla de ambas masas de aire, es decir, en la estación Entrada, como se comprueba en la tabla VIII.

Estación	T °C
Exterior	-2,80
Entrada	10,94
Órgano	12,69

Tabla VIII. Valores de la temperatura del aire en las estaciones Exterior, Entrada y Órgano. Se aprecia que en Entrada la temperatura es inferior al resto de la cueva. Mediciones realizadas el 1 de marzo de 2005.

La diferencia entre ambas estaciones, Entrada y Órgano, sería superior si solo fuera el proceso de humedecimiento el único que afectara esa zona de la cueva. Otros procesos como la decalcificación, que es exotérmico, contribuyen con la generación de calor a mantener un cierto equilibrio térmico, además del aporte de la roca, que juega un papel termorregulador muy importante.

2.2. Comportamiento del CO₂.

Uno de los parámetros fundamentales para la conservación de las cuevas, es la concentración de CO₂ en el aire, quien influye no solo en el comportamiento del gas en la atmósfera. Su capacidad de disolverse en el agua, ya sea en los depósitos, en el goteo o en el agua de condensación, también influyen en los procesos de deposición de calcita o su disolución, favoreciendo este último la corrosión o redisolución de las formaciones secundarias.

Se ha comprobado, en trabajos anteriores, la influencia de la cantidad de visitantes sobre la concentración de CO₂ en la cueva Pozalagua (Otero et. al. 2005, 2006 y 2007). El efecto acumulativo de este gas no solo depende del número de personas que entran diariamente, también es primordial la aireación del edificio y mantener libres las zonas de intercambio de masa y energía con el exterior.

La apertura de la puerta de la cueva, manteniéndola así durante el día, y de las ventanas de la edificación, favorece la reventilación del edificio y permite la migración del CO₂ hacia el exterior, independientemente de la dirección de las corrientes de aire predominantes, es decir, aun cuando una masa de aire esté entrando a la cueva, si la presión parcial del interior de la cueva es superior a la de la atmósfera exterior, el movimiento browniano orientará las moléculas hacia el exterior, obedeciendo las leyes de Henry y Graham.

La ley de Henry postula que, en una mezcla gaseosa, cada gas se comportará de forma independiente al resto. La ley de Graham establece que: *“La velocidad de difusión de los gases es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad o masa molecular, siempre que estén sometidos a la misma temperatura”*

De los cuatro años estudiados, el periodo de menor afluencia de visitantes a la cueva fue el 2005 – 2006, con valores inferiores en la concentración de CO₂ en todas las estaciones, excepto Órgano, cuya concentración supera solo el periodo 2004 – 2005.

A pesar del importante incremento del número de visitantes en los años posteriores, se aprecia en la figura 19 una cierta reducción en la concentración promedio anual, acercándose en las estaciones Órgano y Entrada, a los valores mínimos obtenidos en el periodo de mínima concentración 2005 – 2006. El promedio anual total de la cueva sufrió un brusco descenso entre el primero y el segundo periodos de mediciones, cuando se limitaron las visitas a 80 personas simultáneas en la cavidad.

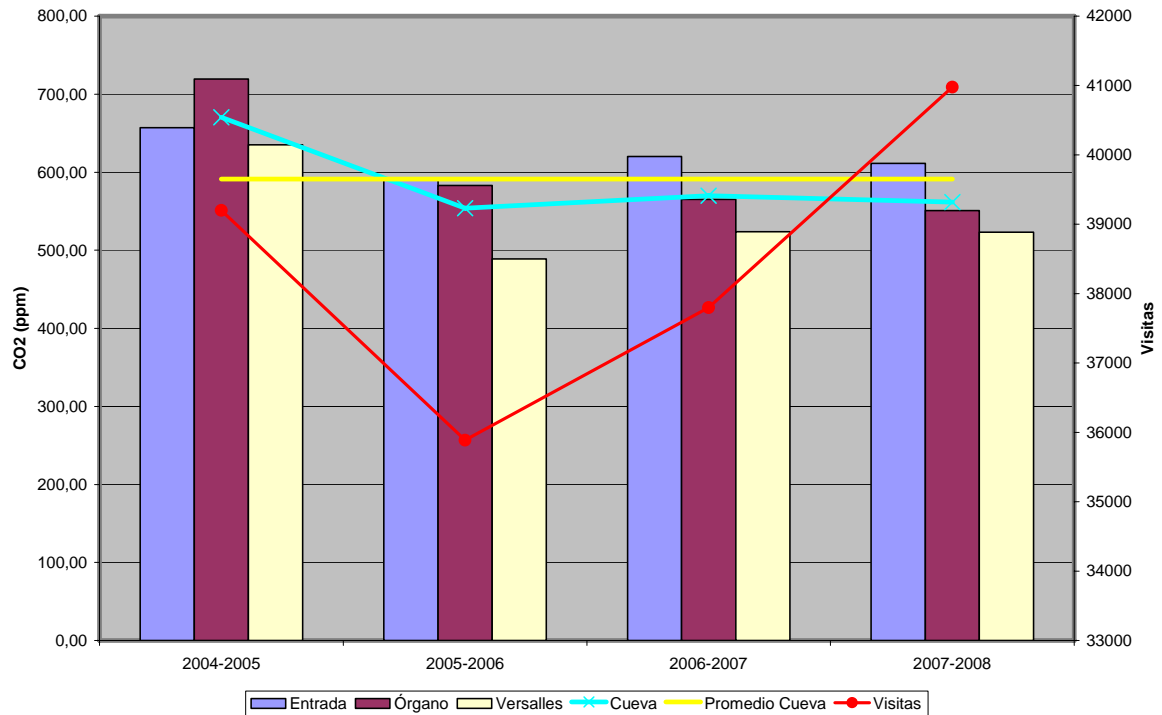


Figura 19. Comportamiento del promedio anual de la concentración de CO₂ en la cueva.

Entre el segundo y tercer periodos (entre el 2005 – 2006 y el 2006 – 2007) se aprecia un ligero incremento en la concentración anual total de CO₂, descendiendo nuevamente en el ultimo periodo, a pesar del cambio de pendiente en el total de visitantes que refleja un incremento más acelerado, llegando al número máximo de visitas, alcanzado durante este estudio.

Llama la atención el cambio de la distribución de la concentración promedio anual en cada estación. En el primer periodo la estación Órgano era la de mayor concentración de CO₂. Con el cierre de las grietas, en octubre de 2005, comenzó una redistribución de las líneas de circulación (Otero *et. al.* 2006) que reorganizó los flujos del aire en general y la concentración del CO₂ en particular (Otero *et. al.* 2007). Con este nuevo modelo la distribución de la concentración cambió, tomando los valores máximos la estación Entrada.

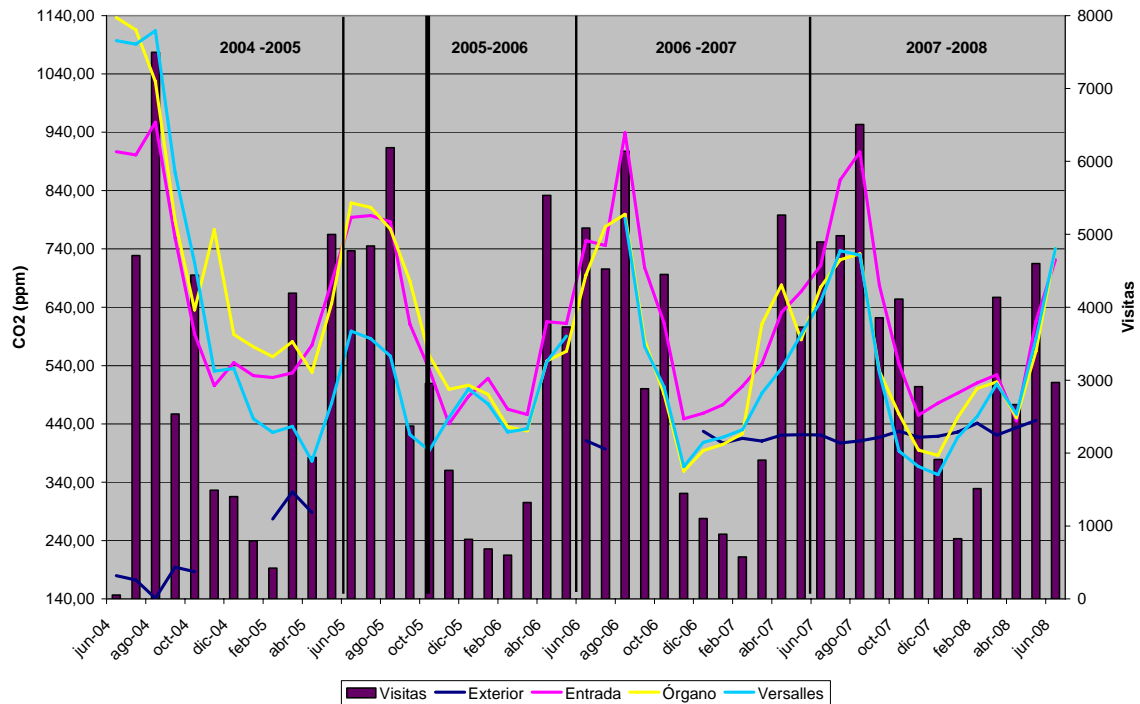


Figura 20. Comportamiento del promedio mensual del CO₂ en la cueva y su relación con los totales mensuales de visitantes. En la gráfica aparece señalado, con una línea más gruesa, el momento de sellado de las grietas por problemas de estabilidad de la edificación, en octubre de 2005.

Al revisar los valores de los promedios mensuales de la concentración de CO₂ en la cueva, se aprecia también el desplazamiento de las curvas, observándose el incremento del valor en la estación Entrada, en relación al resto de la cueva.

En la figura 20 también se aprecia la reducción significativa de la concentración del CO₂ en todas las estaciones, en agosto del 2008, respecto al mismo mes del 2007, aun cuando hubo un incremento de cerca de 500 personas en el último mes.

Al analizar la concentración de CO₂ en la gráfica horaria, se aprecia que el comportamiento de las concentraciones es similar en los años 2006 y 2007, aunque en el último el efecto acumulativo fue algo menos manifiesto, con un mejor tiempo de recuperación.

Lo anterior se aprecia tanto en la estación Entrada, como en las interiores (fig. 21 y 22). Las concentraciones del gas son más evidentes en la primera estación por la migración desde el interior de la cueva hacia el exterior. Comparando el comportamiento de la concentración del gas en ambos años, se puede resumir que, la concentración en el interior de la cueva está directamente relacionada con la concentración en la zona de la Entrada.

Esta hipótesis se fundamenta en el hecho que, es precisamente por la zona de la puerta de la cueva, por el lugar donde el CO₂ migra hacia el exterior en la actualidad. Mientras más rápida sea la evacuación de este gas hacia el exterior, a mayor velocidad será la recuperación de los niveles normales de concentración en el interior de la cueva.

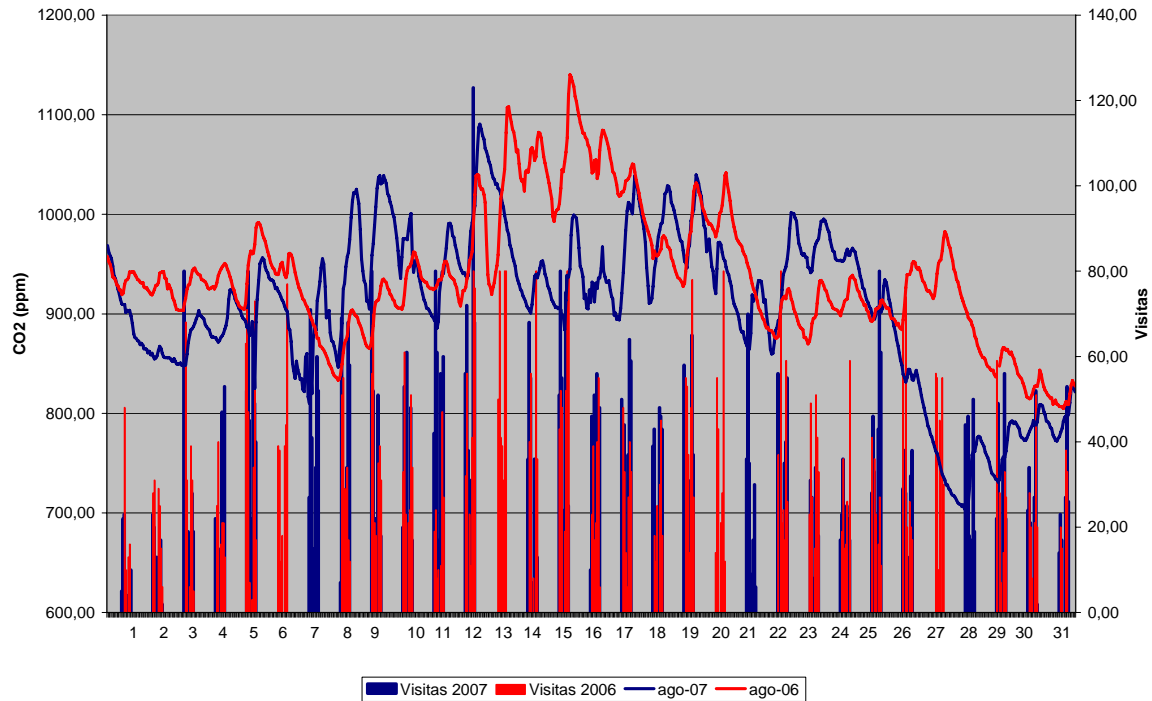


Figura 21. Relación entre el número de visitantes y la concentración de CO₂ en los meses de agosto de 2006 y 2007 en la estación Entrada.

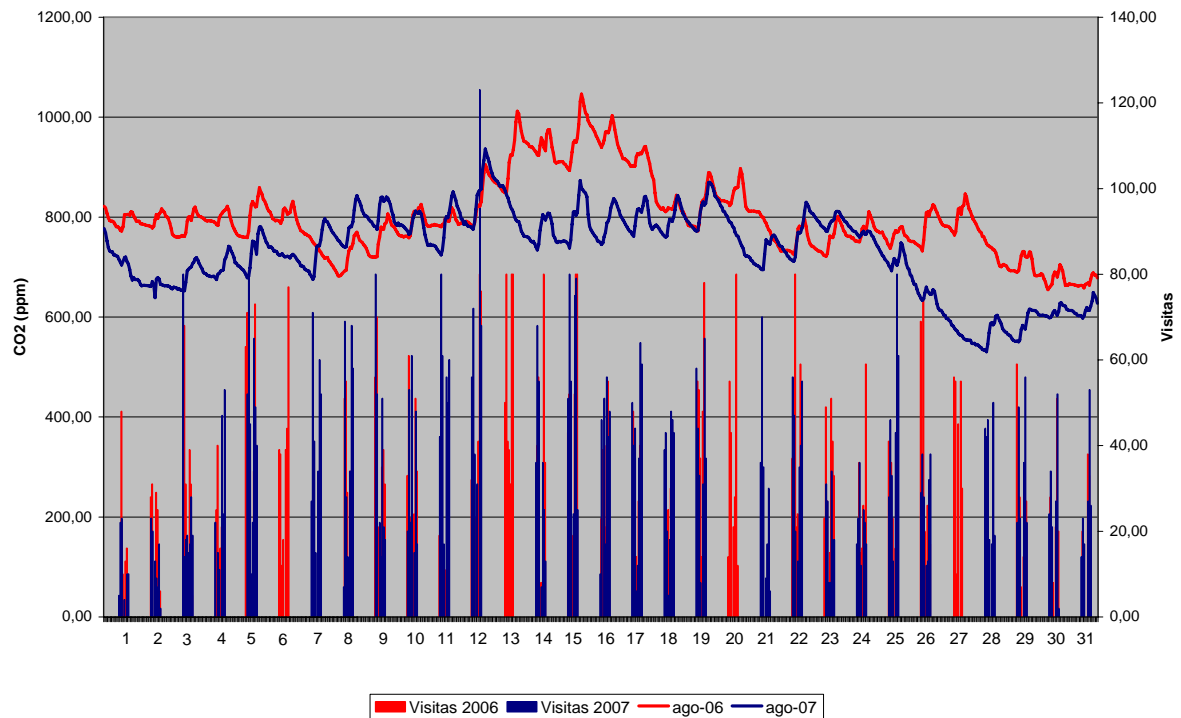


Figura 21. Relación entre el número de visitantes y la concentración de CO₂ en los meses de agosto de 2006 y 2007 en la estación Órgano.

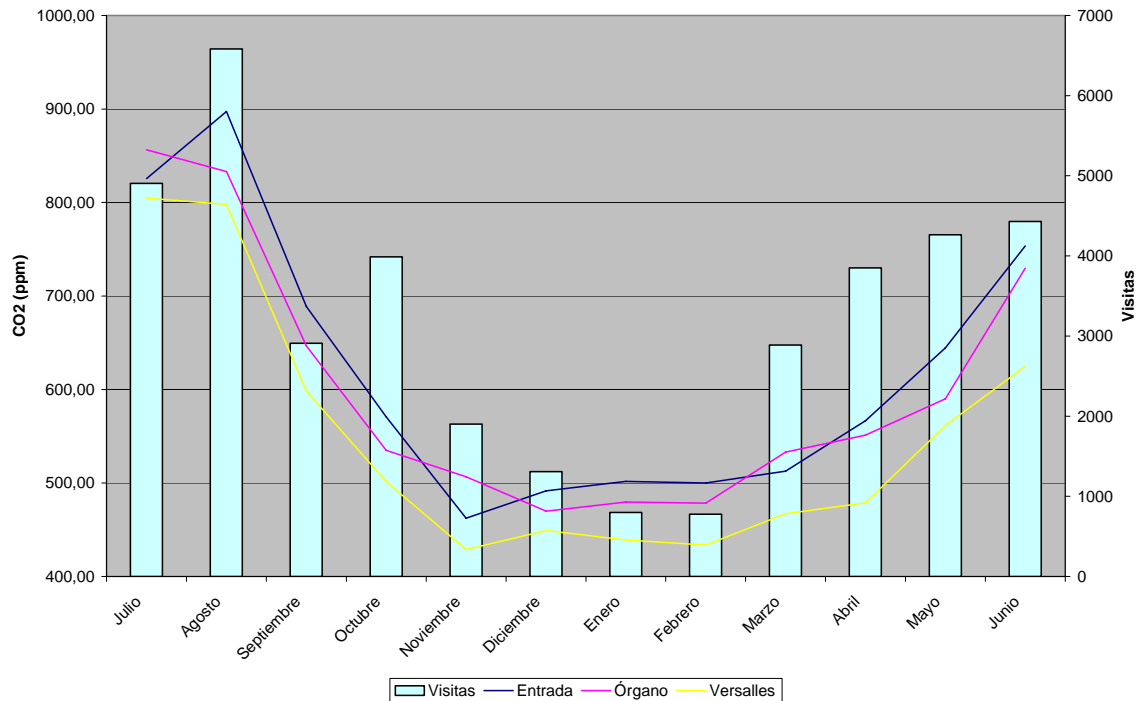


Figura 22. Comportamiento del promedio de cada mes en los cuatro años de estudios y su relación con las visitas.

En la figura 22 se muestra el comportamiento promedio de cada mes en los cuatro años de mediciones. En la misma se aprecia la evolución de la concentración de CO₂ en relación al régimen de visitas, manifestándose el efecto acumulativo del gas en la medida que se incrementa el número de visitantes mensuales.

Una brusca disminución de la frecuencia de las visitas a la cueva, se aprecia como la pendiente de la curva de CO₂ se hace más pronunciada, como en el caso del mes de septiembre, cuando se reduce la cantidad de personas en la cueva a un valor cercano a la mitad del valor de agosto. Aunque en octubre la cantidad de visitantes se incrementa, la concentración sigue descendiendo, aunque la pendiente de recuperación se haga algo más suave (figura 22).

2.3. Relación de la concentración de CO₂ y el Índice de Saturación respecto a la calcita.

Como se ha manifestado en trabajos anteriores (Eraso 1969, García 1972, Otero 1990, 1995, 2007, Otero *et. al.* 2005, 2006, 2007; Fernández Cortés 2004), existe una dependencia entre la concentración del CO₂ atmosférico y el efecto de corrosión en las cuevas.

El equilibrio de la concentración de CO₂ en el agua va a depender, directamente, de la concentración de CO₂ en el aire y la temperatura (figura 23).

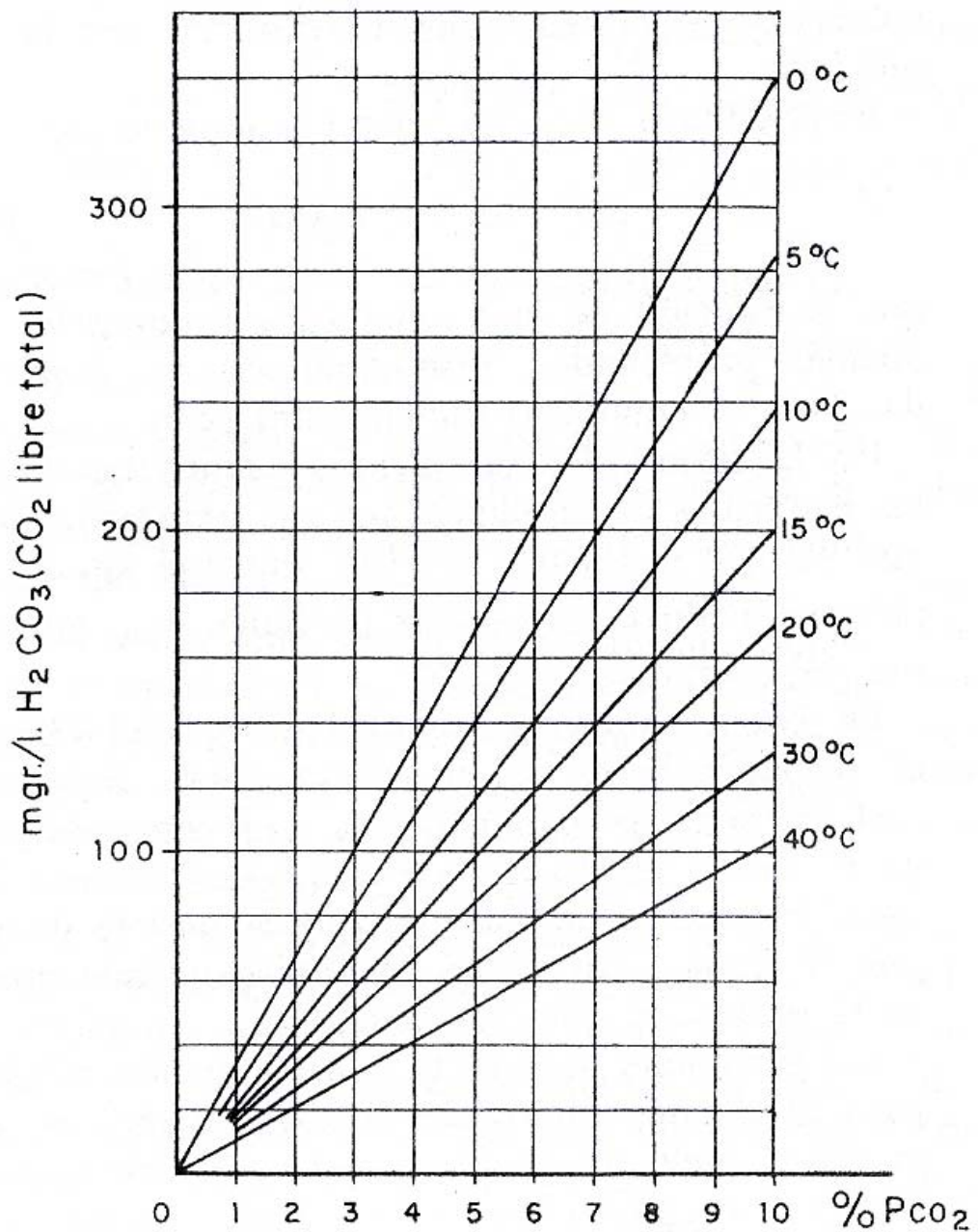


Figura 23. Distribución del CO₂ entre el aire y el agua, tomado de Eraso (1969b).

En la figura 24 se aprecia la relación existente entre el CO₂ disuelto en el agua y el del aire. El análisis de regresión lineal realizado confirma una elevada correlación entre ambos parámetros, con un coeficiente de correlación de 0,88, que explica un 77 % de las variaciones de la concentración del CO₂ en el agua.

La diferencia principal entre las figuras 23 y 24 radica que la figura 24 se desarrolla en el cuadrante formado por el 1 % de Pco₂ de la figura 23.

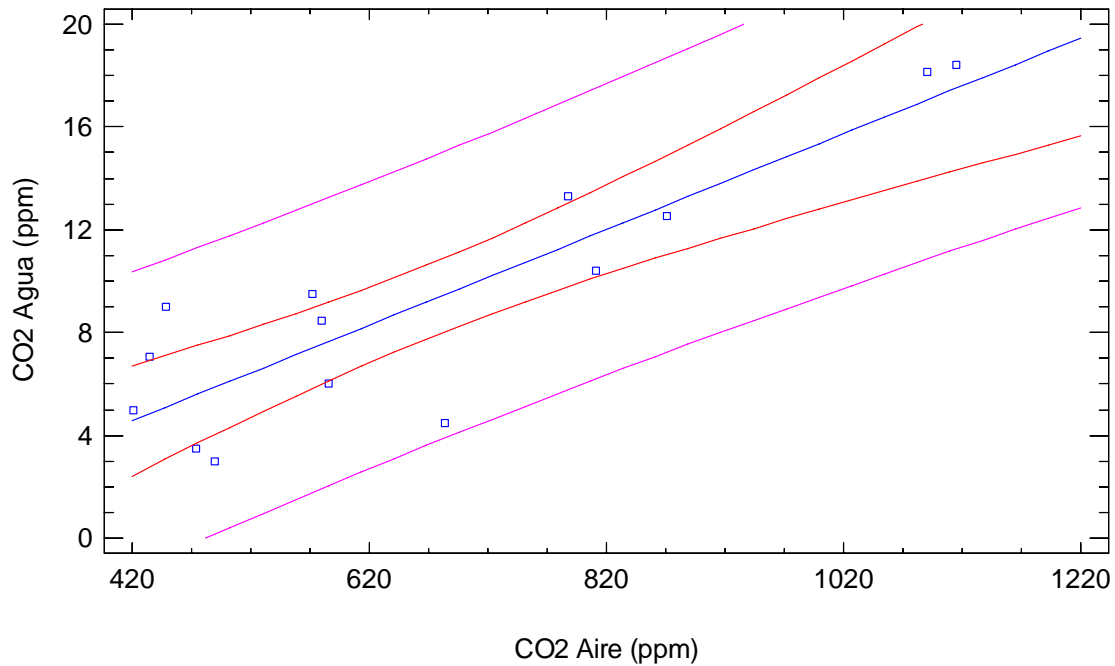


Figura 24. Relación entre el CO₂ del aire y el disuelto en al agua en la cueva Pozalagua. Se puede apreciar la ligera dispersión sobre la línea de cálculo de la regresión lineal. Esta relación se desarrolla para temperaturas que oscilan entre 12,5 y 13,2 °C.

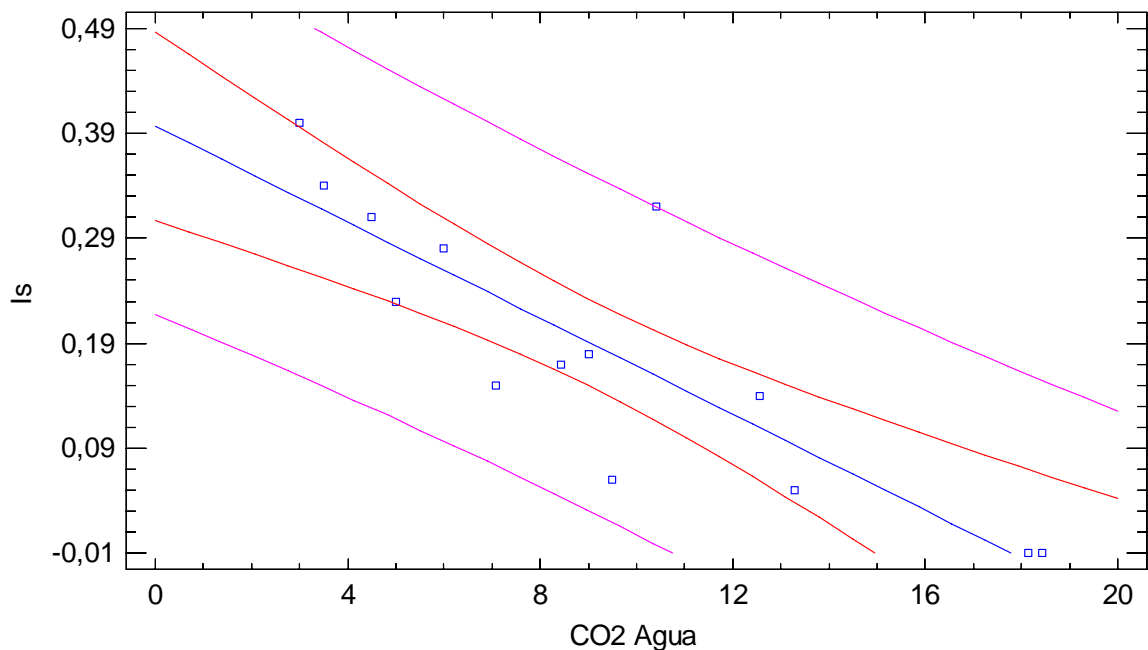


Figura 25. Relación entre el CO₂ disuelto en el agua y el índice de saturación respecto a la calcita (Is) en la cueva Pozalagua.

Uno de los parámetros que describen el estado de saturación del agua, en nuestro caso respecto a la calcita, es el índice de saturación (Is) (White 1977, Fagundo y González 2005, Nagore y Otero 2006). El índice de saturación compara el producto de la actividad iónica determinada experimentalmente, con la constante del producto de solubilidad, expresándose (White 1977):

$$I_s = \frac{\log^a Ca^{*a} CO_3}{Kc}$$

El proceso evolutivo del karst está determinado por una serie de condicionantes iniciales:

- Matriz rocosa.
- Preparación tectónica.
- Agua.
- CO₂.

La matriz rocosa la conforma el sustrato con un componente principal representado por carbonato de calcio (CaCO₃). La historia de los movimientos tectónicos y los diferentes mecanismos generadores de grietas dan al macizo la preparación tectónica necesaria, a partir de la red de agrietamiento formada, se orienta el curso de las aguas subterráneas.

Con estos tres elementos, que en su conjunto dan origen a la circulación por la roca caliza, no es suficiente para la evolución del karst. La baja capacidad de disolución del agua sobre el carbonato de calcio, no permite que esto suceda.

La adición de CO₂, con la generación del ácido carbónico, completa el cuadro necesario para la disolución de la roca caliza, ampliando los conductos, transportando los solutos y depositándolos cuando las condiciones son favorables.

Todo esto se describe por:



Esta simple relación es el resultado de una serie de procesos que, dependiendo de ciertas condiciones ambientales, rigen la dirección de los procesos: la disolución del carbonato de calcio, ya sea en la roca encajante o en las formaciones secundarias, o el proceso de deposición, con la formación de los cristales de calcita o aragonito que dan lugar a los espeleotemas.

Un factor que influye en la cinética de esta relación es la temperatura, como se aprecia en la figura 23, donde se pone de manifiesto la relación inversa entre ella y la dilución del CO₂ en el agua.

El factor más importante en la ecuación de equilibrio, es la presión parcial de CO₂ en la atmósfera y su relación con la presión parcial del gas disuelto en el agua. Dependiendo de la relación entre ambos parámetros, el equilibrio, en la ecuación fundamental del karst, se corre hacia la izquierda, depositando calcita, o a la derecha, disolviéndola (tabla XIX).

Tomando en consideración la influencia del CO₂ disuelto en el agua, sobre el índice de saturación, se realizó un análisis de regresión lineal entre los resultados de ambas variables, arrojando un coeficiente de correlación de -0,85, explicando el 73 % del comportamiento del índice de saturación (figura 25).

En la figura 24 se representa el gráfico resultante de la regresión lineal entre el CO₂ del aire y del agua. El coeficiente de correlación de 0,87 ($r^2 = 77\%$), aunque representan una buena correlación, no es del todo satisfactoria, pues al recalculer el índice de saturación, el error acumulativo se incrementa, haciendo poco confiable el resultado final.

Concentración de CO ₂	Proceso	Efecto
CO ₂ aire > CO ₂ agua	Disolución	Corrosión de espeleotemas
CO ₂ aire < CO ₂ agua	Deposición	Formación de espeleotemas

Tabla XIX. Comportamiento de los procesos en dependencia de la relación entre la concentración del CO₂ en el agua y el aire.

Al recalculer el CO₂ del agua, a partir de este gas, adicionándole la temperatura, el coeficiente r^2 incrementó a un 87 %, confirmando la influencia de la temperatura en la concentración del gas en el agua (figura 26), y elevando la confiabilidad del cálculo del índice de saturación (figura 27).

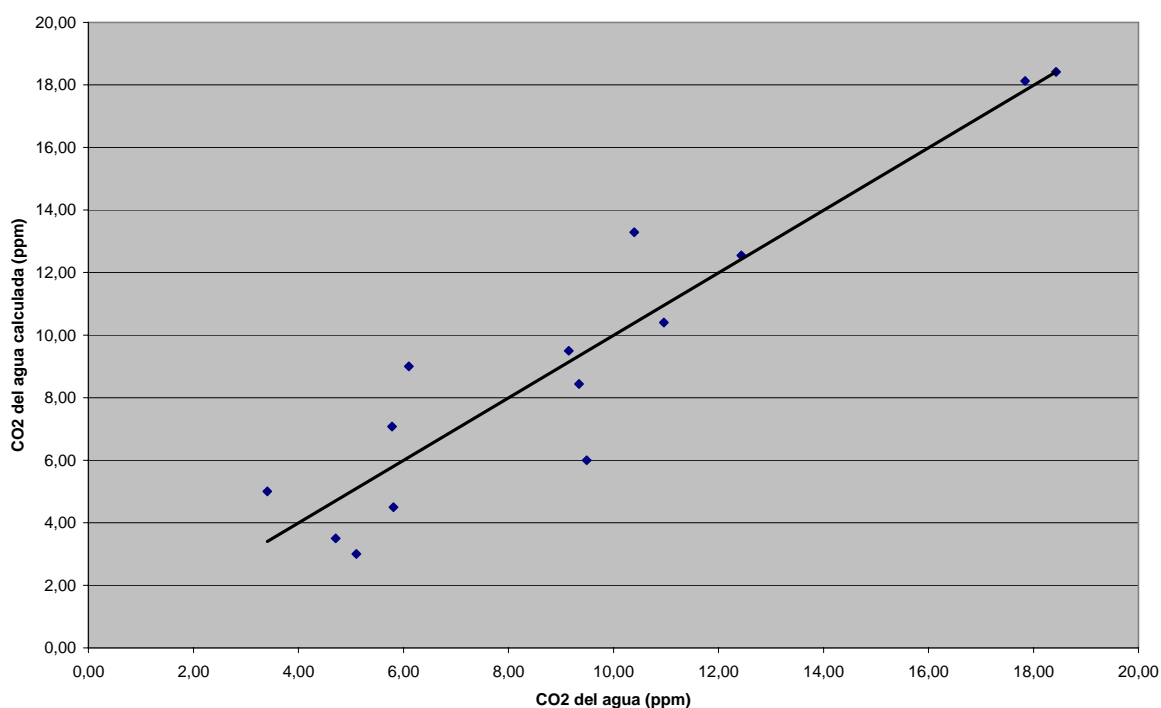


Figura 26. Gráfico que describe la relación entre el CO₂ del aire y del agua, teniendo en cuenta la temperatura. El r^2 es de un 87 %.

La curva que describe la gráfica responde a la forma:

$$\text{CO}_2 \text{ Agua} = 254,999 + 0,0245698 \cdot \text{CO}_2 \text{ Aire} - 20,3059 \cdot T \text{ agua}$$

Esta curva explica el 87 % de la variación del CO₂ disuelto en el agua, partiendo de la concentración del CO₂ en el aire y la temperatura del agua.

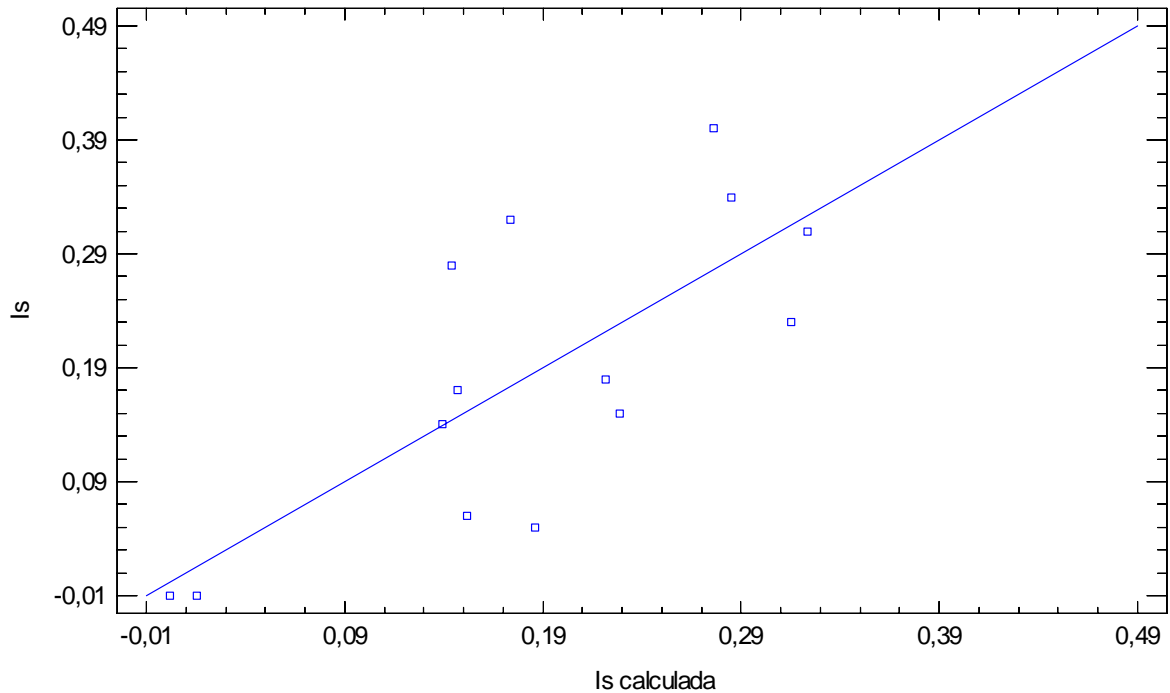


Figura 27. Relación entre la concentración de CO₂ en el aire de la cueva Pozalagua y el índice de saturación respecto a la calcita (Is).

Aunque el índice de saturación calculado, tomando como variables de partida la concentración de CO₂ en el aire y la temperatura, solo explica el 55 % del comportamiento del índice de saturación obtenido experimentalmente, los valores pueden orientar sobre los procesos que pudieran tener lugar en el agua.

Para mejorar la calidad de la predicción, sería necesario incrementar el muestreo de agua para los análisis.

Se debe tener en cuenta que, los análisis fueron realizados a aguas con cierto contenido de sales, es decir aguas que ya presentan un grado de equilibrio entre carbonatos, CO₂ y los procesos de corrosión se manifiestan en menor cuantía. El mayor peligro en la cueva lo representa el agua resultante del proceso de condensación.

El agua condensada sobre las paredes de la cueva, o sobre los espeleotemas, en el momento de depositarse, debe tener un mínimo de sales disueltas, semejante al agua destilada.

Teniendo en cuenta esto, se calculó, partiendo de la fórmula de Henry, la cantidad de CO₂ disuelto en el agua, al momento de la condensación, teniendo en cuenta la concentración de CO₂ en el aire y la temperatura del agua:

$$CO_{2ac} = 0,001964 * CO_{2aire} * [1 - ((t - 15) * 0,025)]$$

Donde:

CO_{2ac}: Concentración del CO₂ disuelto en el agua en ppm.

CO₂aire: Concentración del CO₂ en el aire en ppm.
t: temperatura del agua en °C.

Se asume, para este cálculo, que la temperatura del agua condensada es igual que la temperatura de la roca.

Los valores de CO₂ obtenidos por esta relación, resultan algo bajos, en relación con los reportados para los gours y el agua de goteo (tabla X). En este caso se debe tener en cuenta que, las aguas depositadas en la cueva, presentan un estado de equilibrio con la roca, con una cierta concentración de iones HCO₃ y CO₃, lo que permite una mayor absorción de CO₂.

Esta absorción de CO₂ extra pudiera explicarse por la misma ecuación de equilibrio del karst. Teniendo en cuenta que se toma CO₂ del agua para la disolución del carbonato de calcio de la roca, la porción utilizada se sustituye por otra igual que se toma de la atmósfera (Eraso 1969).

Es por esto que, en el caso del agua condensada, transcurrido cierto tiempo del proceso, la curva que mejor describe su concentración de CO₂ es la calculada en la figura 26.

Temperatura	CO ₂ Aire	CO ₂ Agua	CO ₂ Agua cond.
13	1115	18,42	2,30
13	788	13,29	1,63
12,8	572	9,5	1,19
12,8	580	8,44	1,20
13	811	10,4	1,67
13,1	684	4,5	1,41
12,9	490	3	1,01
13	1091	18,13	2,25
13	871	12,55	1,80
12,8	448	9	0,93
12,8	435	7,07	0,90
12,8	586	6	1,21
12,9	421	5	0,87
12,9	474	3,5	0,98

Tabla X. Relación entre la temperatura del agua, la concentración del CO₂ en el aire, la concentración del CO₂ en las aguas de depósitos y la concentración de CO₂ en el agua de condensación, calculada a partir de la fórmula de Henry modificada.

2.4. Comportamiento del Radón.

El gas radón es un gas noble radiactivo, que puede formar algunos compuestos como cloratos y fluoruros complejos. Presenta varios isótopos, aunque el de interés para el presente trabajo es el ²²²Rn, por tener un tiempo de vida de 3,82 días antes de desintegrarse.

Hasta el momento se desconoce su origen en la cueva Pozalagua, aunque este puede ser por el contenido de minerales radiactivos que forman parte de la roca encajante. Otro medio de transporte muy efectivo es el agua (Cigna 2005), aunque en el caso de estudio, esta sólo viene de la superficie, por lo que se estima que su contribución no sea de primer orden.

Generalmente se utiliza como trazador natural en las cuevas para determinar el intercambio de masa con el exterior, desde un punto de vista cualitativo, principalmente para determinar la dirección de los procesos.

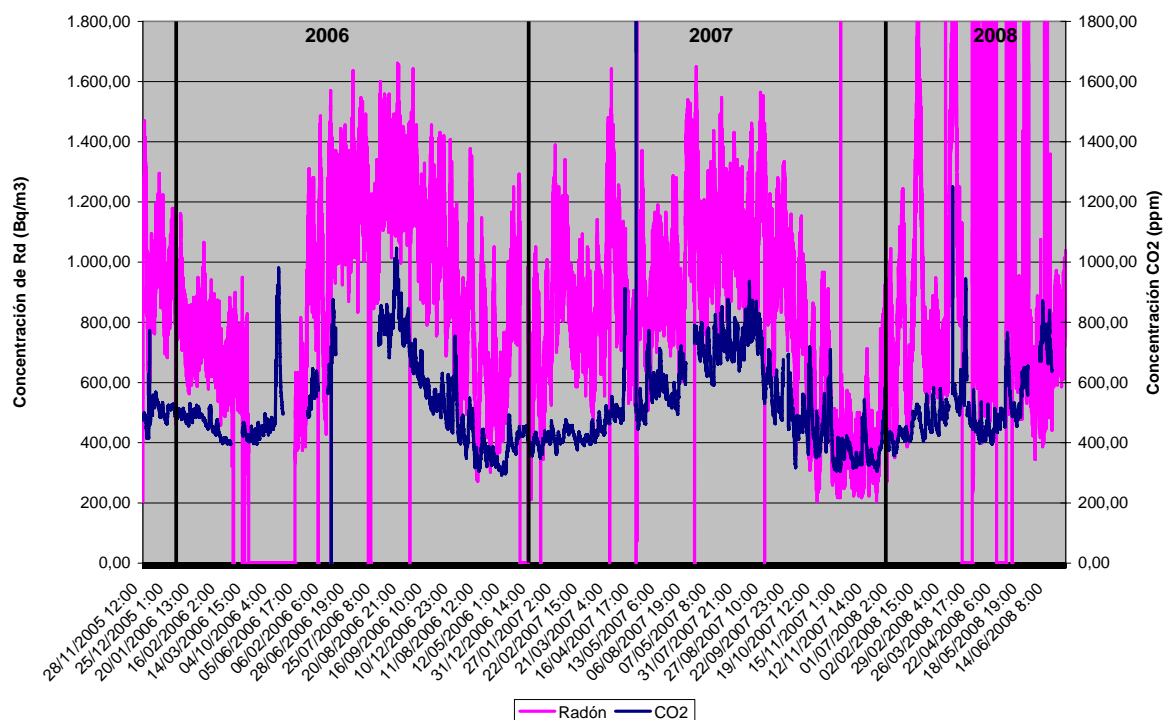


Figura 28. Comportamiento de la concentración de Radón, en la atmósfera, y su relación con la concentración del CO₂.

Llama la atención la coincidencia en el comportamiento entre las curvas de CO₂ y Radón (figura 28), en el interior de la cueva, aun cuando se conoce que el origen de ambos gases es totalmente independiente, como han reportado otros autores (Batiot – Guilhe *et. al.* 2007, Cigna 2003, 2005).

El carácter cíclico anual del Radón, coincide con el comportamiento del CO₂ y es inverso al de la temperatura (figura 29). Las mayores concentraciones tienen lugar en el verano, cuando hay mayor confluencia de público y en la cueva el aire tiende a circular desde el interior hacia el exterior en Pozalagua (Otero *et. al.* 2005, 2006 y 2007).

Se debe señalar que en los meses de marzo, abril y mayo, se reportaron valores anormalmente altos, superiores a los 100 000 Bq/m³, llegando incluso a superar los 700 000 Bq/m³. El origen de estas elevadísimas concentraciones fue producto de los trabajos de reparación de las pasarelas. En análisis realizados por especialistas en radioactividad de la Universidad del país Vasco, se consideró que el origen

podía ser debido al gas originado por el uso de cierto tipo de electrodos utilizados en la soldadura.

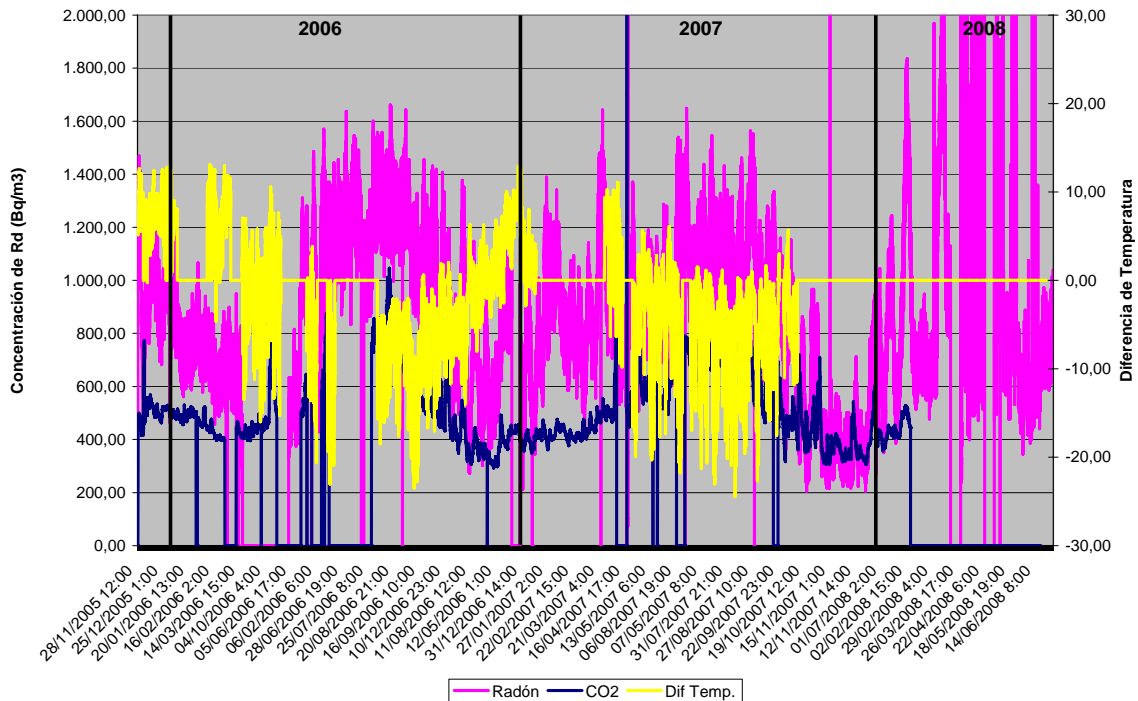


Figura 29. Relación entre las concentraciones de CO₂, Radón y la diferencia de temperatura entre la estación Órgano (lugar donde se ubica la estación de medición de la concentración de Radón) y Exterior ($\Delta T = T_{int} - T_{ext}$).

En años anteriores se ha comprobado que, la fuente de CO₂ en Pozalagua, son los visitantes. En los periodos de mayor afluencia de público, se aprecia un efecto acumulativo de la concentración del gas, que favorece su incremento hasta valores superiores a los 1000 ppm. Esto se manifiesta en los meses de verano y en Semana Santa.

En el caso de la concentración de Radón, presenta varios periodos de valores elevados, superiores a los 1000 Bq/m³, que no están circunscritos al verano. En los meses de diciembre y febrero se aprecian intervalos de varios días con altos valores medidos.

Al comparar los resultados del Radón con la diferencia de la temperatura entre el interior y el exterior de la cueva, se aprecia que los valores elevados del gas se manifiestan aun cuando la temperatura hipogea es superior a la epigea, es decir, en momentos en el aire está entrando a la cueva. Estos últimos son valores que presentan una cierta anomalía, respecto al comportamiento que refiere el Radón durante el periodo de mediciones y solo podrán ser explicadas cuando se conozca el origen del gas.

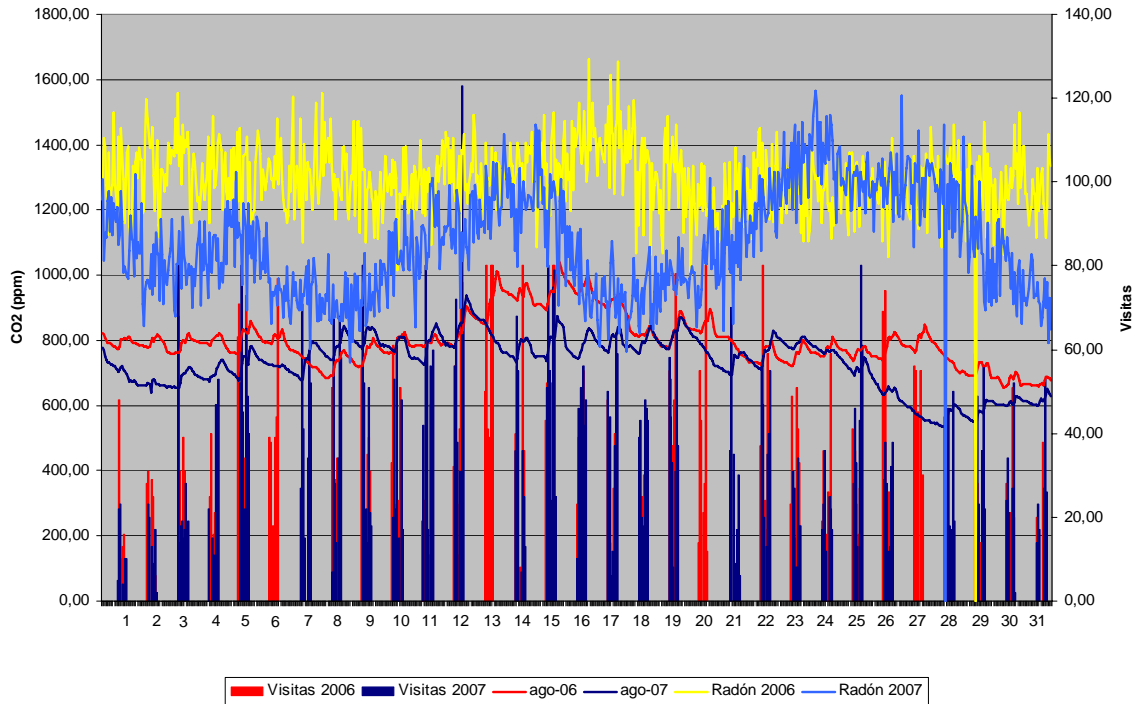


Figura 30. Relación entre las concentraciones de CO₂, Radón y visitantes durante los meses de agosto de los años 2006 y 2007.

Para determinar la existencia de alguna relación entre el gas Radón y las visitas, se relacionaron gráficamente ambas variables, en los meses de agosto de los años 2006 y 2007 (figura 30). En el análisis se incluyó el CO₂, apreciándose el efecto que produce el factor de escala, es decir, a menor escala de tiempo, más independiente resulta el Radón de las otras variables analizadas (figuras 30 a la 34).

Para determinar la relación del Radón con las visitas a la cueva, se seleccionaron 4 días en el año 2007:

15 de agosto: Día de mayor cantidad de visitantes en el mes con 389 personas. El día 13 el número de visitantes fue nulo, y el 14 entraron 240 personas.

27 de agosto: Día con cero (0) visitas. Los días 25 y 26 entraron 304 y 190 personas a la cueva.

22 de febrero: Ese día y los tres anteriores no tuvieron visitantes.

21 de diciembre: Día con cero visitas. Desde el día 17 solo entraron 7 personas el 18 de ese mes. Hasta el propio día 21 no hubo visitantes en la cueva.

La selección de estos días, obedeció al criterio de contrastar periodos de alta afluencia de público, con meses de baja.

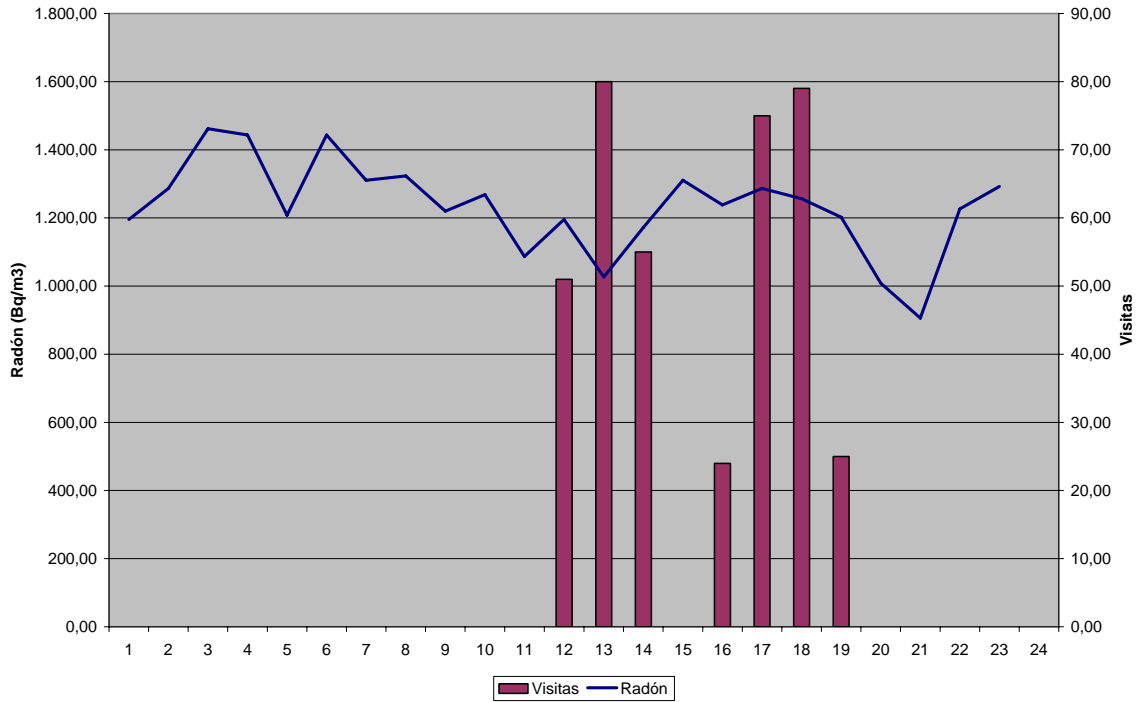


Figura 31. Relación entre la concentración de Radón y el número de visitantes el 15 de agosto de 2007. El número total de personas fue de 389.

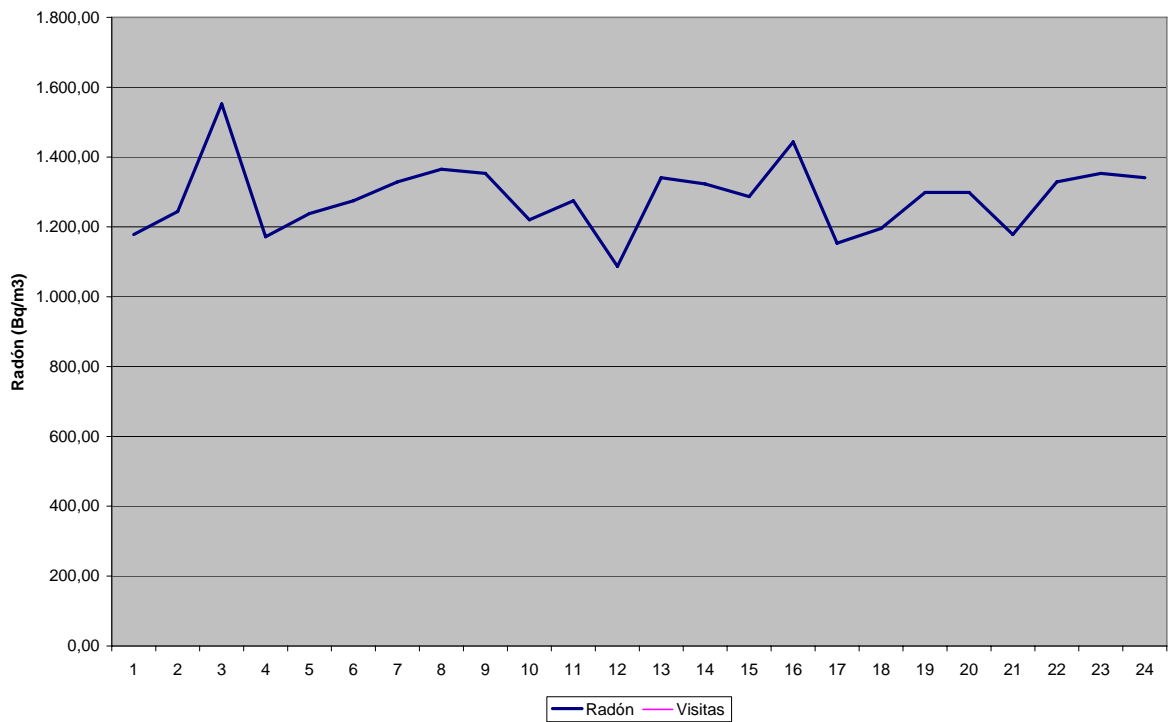


Figura 32. Relación entre la concentración de Radón y el número de visitantes el 27 de agosto de 2007. Ese día no hubo visitas.

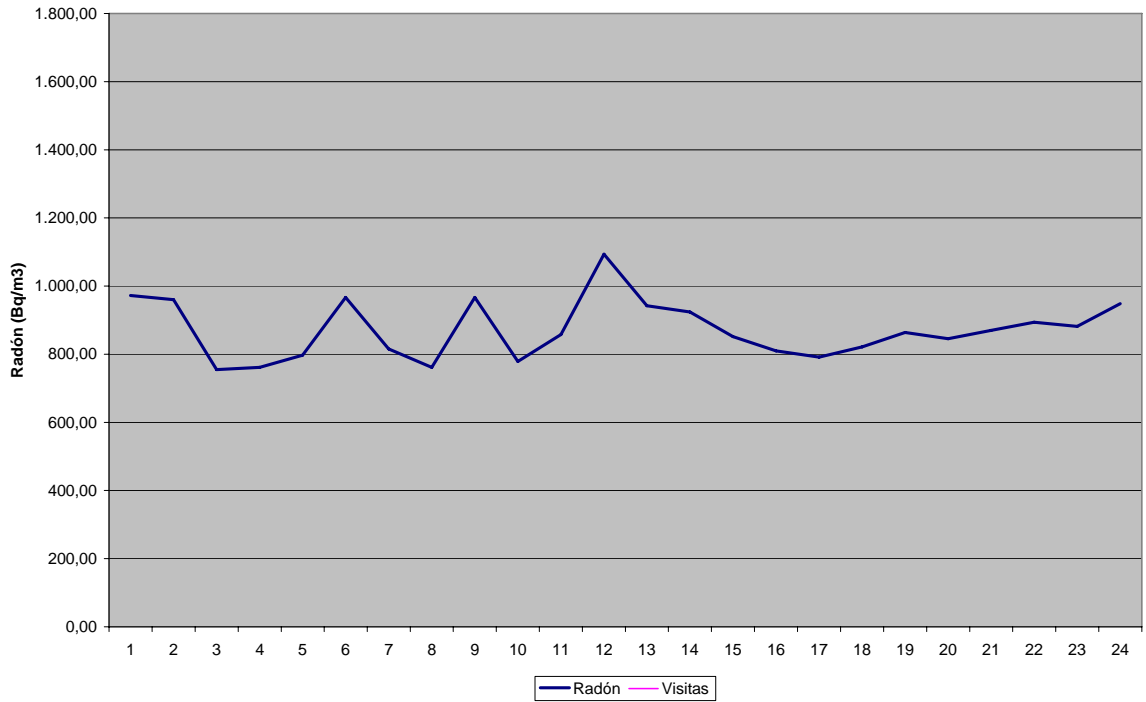


Figura 33. Relación entre la concentración de Radón y el número de visitantes el 22 de febrero de 2007. Ese día fue la cuarta jornada consecutiva sin visitas.

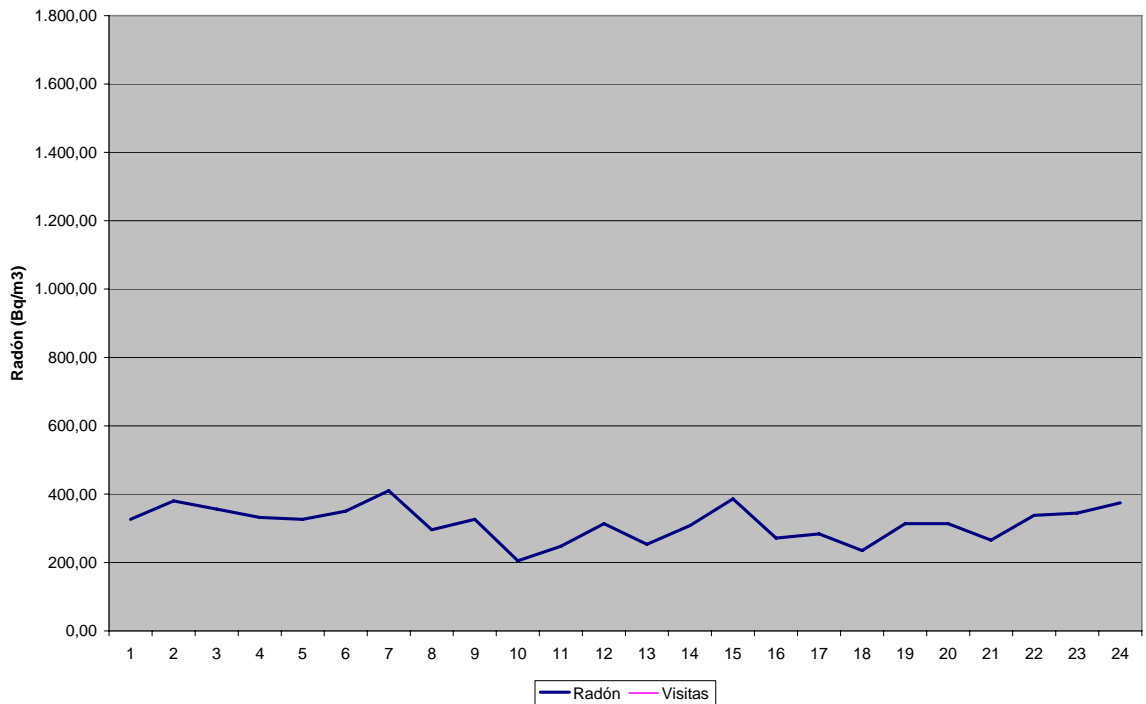


Figura 34. Relación entre la concentración de Radón y el número de visitantes el 21 de diciembre de 2007. Ese día fue la tercera jornada consecutiva sin visitas.

Como se aprecia en las figuras anteriores, el día 27 de agosto es el que presenta la mayor concentración de los días seleccionados, a pesar de no tener visitantes. En el día 15 se aprecia una mayor fluctuación de los valores de Radón respecto a los demás.

El comportamiento del Radón en diciembre y febrero no fue como era de esperar, pues debía presentar menor concentración en febrero, que es cuando disminuye al mínimo la cantidad de visitantes a la cueva. El comportamiento real fue que el 22 de febrero la concentración del gas osciló entre los 800 y 1000 Bq/m³, mientras que el 21 de diciembre esta se encontraba entre los 200 y 400 Bq/m³.

Del análisis anterior se puede deducir que, el régimen de visitas a la cueva solo presenta una cierta influencia sobre la estabilidad de la concentración. La explicación de este fenómeno está en las microcorrientes generadas por el paso de los visitantes, no solo por el aire que desplazan al caminar, sino por el efecto térmico que genera las celdas de convección en la masa gaseosa (Radón incluido) (Otero *et. al.* 2007).

Otro efecto indirecto de los visitantes sobre la concentración de Radón, es en los meses de invierno. En esa temporada, aunque acuden a la cueva un menor número de personas, los días de visitas se mantiene la puerta de la cueva abierta, lo que permite una mayor entrada de aire a la cueva, al aumentar el área de comunicación entre los sistemas exterior y subterráneo. Es precisamente en la estación invernal, cuando el aire tiende a entrar a la cueva.

La entrada de una mayor masa de aire a la cueva conlleva a un decrecimiento importante de la concentración del gas Radón.

3. Conclusiones.

1. A pesar del incremento de la cantidad de visitantes en el periodo comprendido entre julio de 2007 y junio de 2008, el promedio de temperatura descendió, llegando a niveles similares al periodo 2005 – 2006, que tuvo el menor valor de visitantes.
2. Tomando como referencia el grado de estabilidad térmica de la atmósfera subterránea, se definieron dos zonas en la cueva: una de mayor intercambio energético con el exterior, cercano al sector de la entrada y la zona más estable, conformada por el resto de la cueva. Los límites entre ambas zonas son imprecisos y variables en dependencia de la época del año.
3. En los meses de verano, a pesar de concentrar la mayor cantidad de visitantes, es el periodo térmicamente más estable en la cueva, confirmando que el régimen de visitas actual no afecta el equilibrio térmico de la cavidad.
4. En los meses de invierno, la entrada del aire del sistema exterior crea un equilibrio térmico más inestable que en los meses de verano, cuando la circulación es hacia el exterior.
5. En los meses de invierno se produce un proceso de humidificación de la masa que penetra en el sistema, que contribuye al descenso de la temperatura en la cueva, además del efecto propio de la convección. En el sector cercano a la entrada, la roca y los procesos de corrosión que tienen lugar, juegan un papel

termorregulador fundamental, evitando, en esa zona, mayores descensos de la temperatura.

6. El periodo 2007 – 2008, aun siendo el de los valores máximos de visitantes, tuvo valores mínimos de concentración de CO₂ respecto a los anteriores periodos de mediciones. Este comportamiento del gas es propiciado por la permanente apertura de la puerta en los horarios de visitas y mantener abiertas las ventanas del edificio. Sus valores deben descender aun más, cuando se realice la apertura de los respiraderos en la roca, propuestos en memorias anteriores.

7. Se modeló la relación entre la concentración de CO₂ en el aire, en el agua y la temperatura del líquido, respondiendo a la siguiente ecuación para Pozalagua:

$$\text{CO}_2 \text{ Agua} = 254,999 + 0,0245698 * \text{CO}_2 \text{ Aire} - 20,3059 * T \text{ agua}$$

8. La concentración de Radón presenta un comportamiento cíclico anual, con valores máximos en verano y mínimos en invierno, parecido al del CO₂ atmosférico, aunque sin una relación directa con el número de visitantes.

9. Un efecto indirecto de las visitas invernales es que, al mantener la puerta de la cueva abierta, permite una mayor circulación de aire en la cavidad, lo que favorece la reducción de la concentración de Radón en la cavidad.

4. Recomendaciones.

El mantenimiento del régimen de visitas y la apertura de la puerta de la cueva y las ventanas del edificio, son acciones que contribuyen, como se ha demostrado, ha mantener los índices medidos con valores que semejen a los naturales.

La ampliación del área de ventilación de la cueva, principalmente en invierno, contribuiría a mantener bajos las concentraciones de CO₂ en el aire y del gas Radón, por lo que se insiste en la necesidad de la apertura de los huecos en la roca en la zona señalada en memorias anteriores para un mejor intercambio de la cueva de masa y energía con el exterior.

Estas aperturas no deben ser abiertas en otros lugares de la cueva, pues modificarían de forma sustancial los mecanismos de termotransferencia, originando gravísimos daños a las formaciones secundarias.

Una recomendación muy importante es el mantenimiento de las mediciones, como única forma de mantener un control sobre los procesos que tienen lugar en la cueva, y un medio de alerta ante cualquier cambio que pudiera perjudicar el entorno cavernario.

Bibliografía.

Andrieux,C. (1969 a). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques. Thèse Doctorat, Université Bordeaux.

Andrieux,C. (1969 b). Étude du climat de la grotte de Sainte-Catherine en Ariège selon le cycle 1967. Annales de Spéléologie, 24(1), 19-74.

Andrieux,C. (1970 a). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (1. Instrumentation en climatologie souterrain. 2. Aérodynamique souterraine). Annales de Spéléologie, 25(2), 441-529.

Andrieux,C. (1970 b). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (3. Évapocondensation souterraine). Annales de Spéléologie, 25(3), 531-559.

Andrieux,C. (1971 a). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (4. Influence de la morphologie des galeries, de la forme et de l'orientation des ouvertures sur le climat souterrain). Annales de Spéléologie, 26(1), 5-30.

Andrieux,C. (1971 b). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (4. Les bilans climatiques). Annales de Spéléologie, 26(2), 367-386.

Andrieux,C. (1972). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (6. Étude du climat de la grotte-laboratoire de Soulabé en Ariège - cycle 1967-1968). Annales de Spéléologie, 27(1), 5-77.

Andrieux,C. (1973). Étude du climat de la grotte du Pigailh (Ariège). Problèmes posés par les mécanismes des transferts thermiques. Annales de Spéléologie, 28(3), 361-374.

Atkinson. T. C. (1977). Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: An important control of groundwater hardness in limestone. Journal of Hydrology, 35:111 – 123.

Bennet. C. O. y J. E. Myers (1962). Momentum, heat and mass transfer. EPUH – MINED.

Cigna, A. A. (2003). The distribution of Radón concentration in caves. International Journal of Speleology, 32 (1 - 4), 113 - 115. Bologna (Italy).

Cigna. A. A. (2005). Radon in caves. International Journal of Speleology, 34 (1-2), 1-18. Bologna (Italy).

Batiot – Guilhe C., Seidel J. L., Jourde H., Hébrard O., Bailly – Comte V. (2007). Seasonal variations of CO₂ and ²²²Rn in Mediterranean sinkhole – spring (Causse d'Àumelas, SE France. International Journal of Speleology, 36 (1), 51 - 56. Bologna (Italy).

Dublyansky. V N, y Dublyansky. Y. V. (1998). The problems of condensation in karst hydrogeology and speleogenesis. *Journal of cave and karst studies* 60(1): 3 – 17.

Dublyansky VN, Dublyansky YV. 2000. The role of condensation in karst hydrogeology and speleogenesis. In *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, Klimchouck AB, Ford DC, Palmer AN, Dreybrodt W (eds). National Speleological Society: Huntsville, Alabama, 100–112.

Eraso Adolfo. (1963). Ideas sobre la climática subterránea. Separata de Estudios del GE Alavés.

----- (1969a). Corrosión climática en las cavernas. Estratto de *Ressegna Speleologica Italiana*. Anno XXI. Fascicolo 1.4.

----- (1965). Tentative nomogram for cave climate calculations. *Separatum Problems of the speleological research*. Praga.

----- (1963). Estudio del complejo de cavidades de Orratzeta (Monte Albertia-Alava). Separata del GE Alavés.

----- (1969b). Mecanismos sobre la corrosión en el karst y su repercusión en la geodinámica kárstica. *Boletín Geológico y Minero*. T LXXX – II. Pag. 146 – 168). Fagundo. J. R. y González P. (2005). Hidrogeoquímica. Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT). Ministerio de Salud Pública. La Habana, Cuba

Fernández Cortés. Ángel. (2004). Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. 425 pp.

García. Gabriel. (1972). Termoquímica de la reacción de disolución – cristalización del carbonato de calcio y su relación con los fenómenos cársicos. *Rev. Voluntad Hidráulica*. Año XI. No. 32. Pag: 24 – 26.

Irazabal. N. y Otero. V. (2006). Caracterización hidroquímica y microbiológica de las aguas de Pozalagua. Memoria anual.

Kern. D. Q. (1985). Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. Instituto Cubano del Libro.

Lario. Javier, Sergio Sánchez, Vicente Soler, Soledad Cuezva, Juan C. Cañaveras. (2005). Estudio microclimático y geoquímico de la cueva de Pozalagua (Carranza, Vizcaya). IX Congreso Español de Espeleología.

Otero. Vladimir. (1990). Estudio del comportamiento actual de las variables físicas y químicas de la cueva El Cable. Boca de Jaruco. La Habana. Tesis de Categorización Superior de Espeleología.

----- . (1992). Contribución al estudio de la transferencia de masa y energía en las cavernas. Algoritmo de Cálculo. II Congreso Espeleológico de FEALC. Cuba.

----- . (1995) Caracterización de los mecanismos de intercambio de masa y energía de la cueva El Cable. Boca de Jaruco. III Congreso Espeleológico FEALC. Cuba.

Otero. V., Les. J. y Malanda. R. (2005). Estudio del microclima de la Cueva de Pozalagua. (Bizkaia). Período Junio de 2004 a Junio de 2005. Memoria anual.

----- . (2006). Estudio del microclima de la Cueva de Pozalagua. (Bizkaia). Período Junio de 2004 a Junio de 2006. Memoria anual.

----- . (2007). Estudio del microclima de la cueva Pozalagua. Bizkaia. Período de medición 2004-2007. Memoria anual.

Otero. Vladimir. (2007). Particularidades de los mecanismos de circulación del aire en cuevas descendentes. Cueva Tarará 1. Cuba. Primer Congreso de Espeleología de FEPUR y 5^{to} de FEALC. Aguadilla. Puerto Rico.

Sarbu. S. y Lascu. C. (1997). Condensation corrosion in Movable Cave, Romania. Journal of cave and karst studies 59(3): 99 – 102.

Sears. F. Y M. Zemansky (1962). Física General. Asociación de estudiantes de la facultad de Tecnología. Publicaciones.

Sears. F. W. (1971). Mecánica, movimiento ondulatorio y calor. Ed. Revolucionaria.

Thraillkill. John. (1968). Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves. Geol. Soc. America Bull. 79:19 – 45.

Trombe Félix y otros: Recherche souterraines dans les Pyrénées Centrales. Annales de Spéléologie. Tomo III. 1947.

White. William B. (1977). Role of solution kinetics in the development of karst aquifers. Rev. Karst Hydrogeology. Memoir 12, pag. 503 – 517.