

## ANÁLISIS DE OBSERVACIONES DE MAREA DE EXTENSIÓN EN LANZAROTE ANALYSIS OF TIDAL STRAIN OBSERVATIONS IN LANZAROTE ISLAND

Arnosó, J.<sup>(1)</sup>, Vieira, R.<sup>(1)</sup>, Vélez, E.J.<sup>(1)</sup>, Cai, W.<sup>(2)</sup>, Tan, S.<sup>(2)</sup>, Venedikov, A.P.<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM), Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Matemáticas  
28040 Madrid, jose\_arnosó@mat.ucm.es

<sup>(2)</sup>Seismological Institute of SSB, Wuhan, P.R. of China

<sup>(3)</sup>Geophysical Institute, Sofia, Bulgaria

### SUMMARY

The strain response of the Earth to tidal forces is observed in the Geodynamics Laboratory of Lanzarote Island. The instruments, installed in a gallery inside the lava tunnel of Cueva de los Verdes, are kind of horizontal ceramic-tube extensometers. Their base lines comprise from 8 to 38 m length and are orientated in two orthogonal directions (45°.2 N and 135°.2 N), which depend on the situation in the gallery. The reliability of this instruments, which measure the variation of distance between two fixed points with a resolution of  $10^{-10}$ , allow us to dispose long term series of tidal strains since 1992. The data series are analysed in order to study the stability of the instruments. Also, with these data we can determine the tidal strain models, as well as the tidal deformation and the long-term variations of strains in this island. Due to the dependence of the local conditions of the station, which is located in an island, the oceanic influence will be investigated together with local atmospheric disturbing effects. These effects are carefully studied for this station, in order to allow the identification and, if possible, its separation from other signals of interest, given the volcanic feature of the island.

### 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de deformaciones de la corteza terrestre tiene importantes aplicaciones en las investigaciones relacionadas con procesos geodinámicos globales y locales. Estas deformaciones pueden deberse, tanto a las fuerzas que origina el potencial astronómico de marea, como a otros fenómenos geodinámicos que se produzcan en la superficie terrestre. En el Laboratorio de Geodinámica de la Isla de Lanzarote (LGL), se vienen realizando medidas continuas de extensión horizontal (Arnosó et al., 1998) desde el año 1992. Además de registrar la deformación que provoca la propia marea terrestre, estas observaciones permiten estudiar señales relacionadas con fenómenos que puedan considerarse como precursores de actividad volcánica o sísmica.

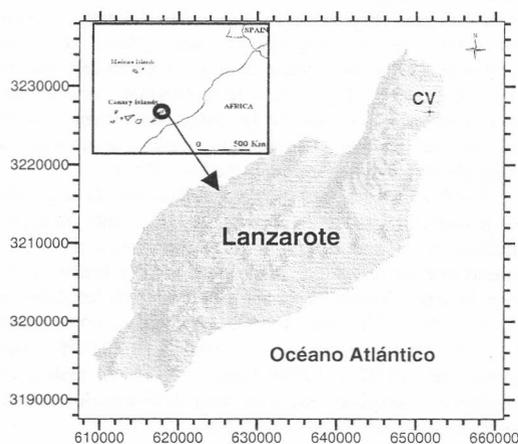


Figura 1 – Situación de la Cueva de los Verdes (CV) en la isla de Lanzarote. Coordenadas UTM en metros. (Location of station Cueva de los Verdes, CV, at Lanzarote Island. Coordinates are UTM in meters).

Los dos extensómetros horizontales instalados en Lanzarote, denominados CE92 y CE94, están dispuestos en dos direcciones ortogonales, siguiendo la geometría de una de las galerías del túnel volcánico donde se encuentra la Cueva de los Verdes, CV, (Figura 1), que constituye uno de los tres módulos de observación del LGL (Vieira et al., 1991). Están contruidos mediante tubos rígidos de cerámica, de 1.5 m de longitud, unidos entre sí hasta conformar una línea de base de 38.22 m de longitud, en el caso del CE92, y de 8.0 m para el CE94. Los acimutes respectivos son de 135°.2 N y 45°.2 N (Figura 2). Los extensómetros se sustentan mediante un anclaje especial de aluminio, donde unos hilos de cobre soportan el peso del instrumento, que están sujetos a una serie de pilares distribuidos a lo largo de toda la longitud de la línea de base. Uno de los extremos permanece fijo, mientras que el opuesto queda libre para permitir el desplazamiento del extensómetro. En este extremo se sitúa un sensor magnético que envía la señal digitalizada, mediante un conversor AD, cada 2 segundos a un sistema de adquisición de datos, donde se almacenan a razón de un dato cada 10 minutos.

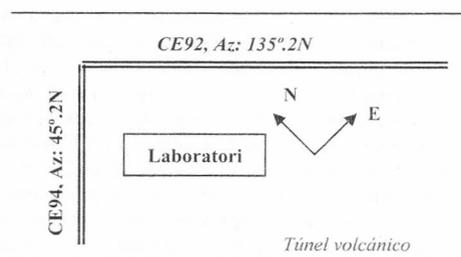


Figura 2 – Esquema de la situación y orientación relativa de los extensómetros horizontales CE92 y CE94 en CV, en el interior del túnel volcánico. (Schematic diagram, which shows the relative orientation of horizontal extensometers CE92 and CE94 at station CV, inside the lava tunnel).

La resolución de estos instrumentos es de  $10^{-10}$  ue (ue = unidad de extensión =  $10^{-9}$ ). La sensibilidad media, desde su instalación, es de  $8.11 \times 10^{-9}$  para el CE92 y de  $8.00 \times 10^{-9}$  para el CE94. La calibración se realiza desplazando el extensómetro mediante un tornillo micrométrico, situado en el extremo que permanece fijo, con una resolución de 0.01 mm (Armoso et al., 1998).

**2. DATOS OBSERVADOS Y ANÁLISIS DE MAREA**

La Figura 3 muestra los datos observados en CV (coordenadas, 29°09'36"N, 13°26'28"W, 37m) con estos instrumentos, junto con las variaciones de temperatura del aire y presión atmosférica, para el mismo periodo de tiempo.

Las condiciones locales de observación garantizan una estabilidad térmica diurna del orden de la décima de grado centígrado, siendo las variaciones anuales del orden de 1.5° C. Sin embargo, la estación está situada en un túnel volcánico de unos 8 Km de longitud, y a una distancia de 1 Km de la línea de costa. Ello va a propiciar que las observaciones realizadas estén "contaminadas" por la acción de fenómenos provocados por la propia dinámica del túnel, el efecto del océano y, también en gran medida, por perturbaciones meteorológicas locales.

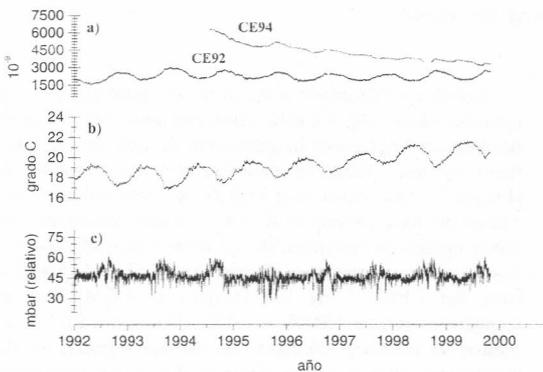


Figura 3 – Valores horarios observados en el LGL. a) Variación de la extensión para las direcciones 45°.2N (CE94) y 135°.2N (CE92). b) Variación de la temperatura del aire observada. c) Variación de la presión atmosférica observada. (Hourly values observed at LGL. a) Strain variations for the azimuths 45°.2N (CE94) and 135°.2N (CE92). b) Variation of observed air temperature. c) Variation of observed air pressure).

La Tabla 1 muestra los modelos de marea obtenidos para ambos extensómetros. El análisis se ha realizado aplicando el método de mínimos cuadrados de Venedikov, con el programa VAV (Venedikov et al., 2001), utilizando el desarrollo del potencial de Tamura (1987). Se puede comprobar que las amplitudes observadas para el extensómetro CE92 son superiores a las del CE94, excepto en el caso de la onda O1 que, como veremos, está muy influenciada por perturbaciones de origen oceánico. Asimismo, comparando los desfases observados para los armónicos K1 y S2, en ambos casos, se aprecia que difieren sustancialmente, lo cual refleja influencias de tipo meteorológico muy importantes en ambos modelos.

Tabla 1 – Resultados del análisis de marea terrestre para los datos de extensión (CE92 y CE94) observados en CV. Las amplitudes están expresadas en  $10^{-9}$  y las fases, locales, en grados (Results of the Earth tide analysis of strain data observed at station CV. Amplitudes in  $10^{-9}$  and phases, in degree, are local)

|      | onda | amplitud | emc  | factor amplitud | emc    | desfase | emc   |
|------|------|----------|------|-----------------|--------|---------|-------|
| CE92 | O1   | 0.33     | 0.11 | 0.0620          | 0.0207 | 18.10   | 19.13 |
|      | K1   | 1.84     | 0.10 | 0.2326          | 0.0131 | -37.13  | 3.24  |
|      | N2   | 0.98     | 0.04 | 0.4653          | 0.0199 | -12.91  | 2.46  |
|      | M2   | 4.77     | 0.04 | 0.4395          | 0.0037 | -23.26  | 0.49  |
|      | S2   | 2.84     | 0.04 | 0.5403          | 0.0082 | -46.33  | 0.87  |
| CE94 | O1   | 1.22     | 0.05 | 0.2263          | 0.0094 | -0.76   | 2.39  |
|      | K1   | 1.24     | 0.04 | 0.1565          | 0.0052 | 13.27   | 2.14  |
|      | N2   | 0.39     | 0.01 | 0.1873          | 0.0060 | -43.40  | 1.84  |
|      | M2   | 1.63     | 0.01 | 0.1507          | 0.0013 | -35.67  | 0.49  |
|      | S2   | 0.83     | 0.01 | 0.1593          | 0.0022 | -4.27   | 0.77  |

En general, los resultados del análisis son muy coherentes entre ambos extensómetros y, a su vez, muestran una muy buena precisión en la separación de las ondas principales (y más significativas) que se han obtenido.

**3. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA**

Como hemos comentado en el epígrafe anterior, los modelos de marea que se han obtenido están enormemente influenciados por perturbaciones de tipo meteorológico, en particular, por las variaciones de la temperatura del aire. En nuestro caso y a pesar de las condiciones de estabilidad térmica que mencionamos anteriormente para la Cueva de los Verdes, y descartando el efecto térmico sobre el sensor e, incluso, sobre el propio extensómetro, dado el bajo coeficiente térmico de dilatación que tiene el tipo de cerámica empleado en su construcción, los datos observados muestran una gran influencia de este parámetro meteorológico (Figura 4). Esta perturbación está provocada por las variaciones de temperatura, que inducen deformaciones termoelásticas. Como consecuencia, se producen movimientos reales del terreno. Este efecto termoelástico, considerado como una perturbación, es una de las principales fuentes de error en este tipo de medidas y, sobre todo, afecta a las frecuencias más bajas (Wyatt, 1982; Harrison y Herbst, 1977).

Podemos hacer una primera evaluación de este efecto de la temperatura sobre la extensión observada, realizando un análisis en el que dicho efecto se determine a través de un coeficiente de regresión, único para toda la banda de frecuencias de marea, mediante un análisis directo de los datos (Armoso et al., 1997). De esta forma, obtenemos unos valores de  $-3.60 \pm 0.010 \cdot 10^{-9} / 0.01^\circ\text{C}$  y  $-1.62 \pm 0.005 \cdot 10^{-9} / 0.01^\circ\text{C}$ , respectivamente para CE92 y CE94. Como vemos, en ambos casos el coeficiente obtenido, que está bien determinado, es más de 2 veces superior en el caso del CE92.

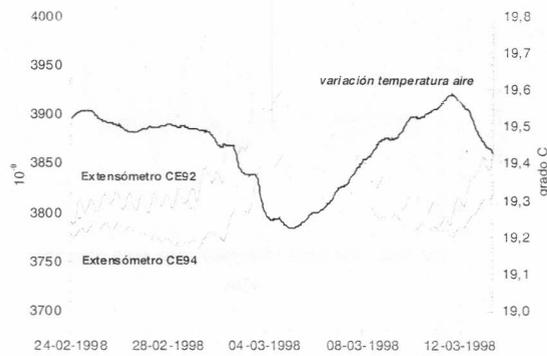


Figura 4 – Extensión observada en CV, entre el 24-02-1998 y el 14-03-1998. También se muestran las variaciones de temperatura del aire registrada para ese mismo periodo. (Strain signal observed at station CV from 24-02-1998 till 14-03-1998. The air temperature variation is also reported for this period of time)

Sin embargo, otra manera de estudiar este tipo de perturbaciones con más detalle, es decir, cuantificando el efecto perturbador a partir del análisis de regresión entre los datos de marea y del parámetro meteorológico perturbador considerado (temperatura, presión del aire), mediante un análisis simultáneo con las incógnitas de marea (Venedikov et al., 2001), en la forma

$$u(T, \Omega) = \mathbf{g}(T, \Omega)\mathbf{x} + v(T, \Omega)b_1(\Omega) + e(T, \Omega) \quad (1)$$

donde  $b_1(\Omega)$  es el coeficiente de regresión (incógnita),  $u(T, \Omega)$  representa los números filtrados de marea,  $v(T, \Omega)$  son los correspondientes números filtrados del parámetro meteorológico considerado,  $\mathbf{g}(T, \Omega)$  es la matriz de coeficientes de las incógnitas de marea,  $\mathbf{x}$ ,  $e(T, \Omega)$  el ruido. Finalmente,  $T=T_1, T_2, \dots, T_N$  es la época central de cada uno de los  $N$  intervalos filtrados (normalmente, cada 48 horas) y  $\Omega=\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_k$  las  $k$  frecuencias de marea consideradas. Así, el coeficiente  $b_1$  representa el efecto sobre los datos de marea observados, para una frecuencia  $\Omega$  determinada.

La Tabla 2 recoge los coeficientes de regresión obtenidos para las frecuencias diurnas de marea desde 1 a 6 cpd, correspondientes al efecto de la temperatura del aire sobre las observaciones de extensión. Como se puede apreciar, este efecto es inverso en ambos casos, siendo de mayor magnitud en todas las frecuencias en el caso del extensómetro CE92. Gráficamente, en la Figura 5 podemos ver con más claridad cómo varía el efecto de temperatura en función de la frecuencia, dependiendo de la componente de extensión que consideremos. Así, en ambos extensómetros, hay un salto cuantitativo muy importante entre las frecuencias de 1 y 2 cpd, que es 3 veces superior en CE92 y, mientras en éste aumenta el valor, en CE94 disminuye. Asimismo, en el caso del CE92, entre 2 y 6 cpd hay variaciones muy importantes en dicho coeficiente, estabilizándose en torno a los 5cpd, mientras que en CE94, a partir de 2cpd, los valores varían muy ligeramente y con un orden de magnitud mucho menor que en CE92.

Tabla 2 – Coeficientes de regresión en función de la frecuencia, obtenidos al analizar el efecto de la temperatura del aire sobre la extensómetros CE92 y CE94 en CV. Los coeficientes están expresados en  $10^{-9}/0.01^\circ\text{C}$  y la frecuencia en cpd. (Frequency dependent coefficients, which correspond to the strain-temperature effect for extensometers CE92 and CE94, at station CV. The coefficients are in  $10^{-9}/0.01^\circ\text{C}$  and the frequency in cpd)

|      | frecuencia | Coefficiente | emc   |
|------|------------|--------------|-------|
| CE92 | 1.0        | -4.606       | 0.112 |
|      | 2.0        | -7.335       | 0.166 |
|      | 3.0        | -6.985       | 0.182 |
|      | 4.0        | -6.422       | 0.183 |
|      | 5.0        | -5.872       | 0.186 |
|      | 6.0        | -5.861       | 0.186 |
| CE94 | 1.0        | -1.428       | 0.049 |
|      | 2.0        | -0.428       | 0.061 |
|      | 3.0        | -0.295       | 0.056 |
|      | 4.0        | -0.357       | 0.055 |
|      | 5.0        | -0.391       | 0.051 |
|      | 6.0        | -0.460       | 0.056 |

Asimismo, mediante este mismo procedimiento, encontramos que estos coeficientes, a su vez, presentan variaciones temporales muy significativas. Como podemos apreciar en la Figura 6, en la que se ha representado la variación temporal para las frecuencias diurnas principales, ambos medidas de extensión presentan variaciones muy importantes, cuantitativamente más altas en el caso del CE92, aunque la tendencia lineal, proporcionalmente, es más acusada en el CE94. Por otra parte, en cada caso, esta tendencia es similar para las frecuencias diurnas representadas.

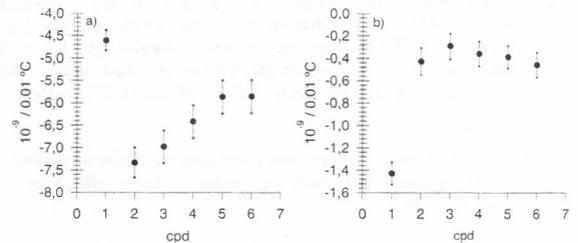


Figura 5 – Representación gráfica de los resultados que aparecen en la Tabla 1, correspondientes a los extensómetros CE92 (a) y CE94 (b). (Graphic representation of results shown in Table 1 for extensometers CE92 (a) and CE94 (b)).

#### 4. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Los resultados del análisis de marea presentan anomalías en las frecuencias de semidiurnas (principalmente, para el armónico S2) que, fundamentalmente, están provocadas por las variaciones de la presión atmosférica. Asimismo, la onda O1 muestra, para ambos modelos de marea, una clara influencia oceánica que, como veremos se produce a través del efecto barométrico inverso.

Procediendo de una manera análoga a la realizada para el caso de la temperatura, una estimación global de este efecto la podemos calcular mediante el análisis directo de los datos. Así, los coeficientes de regresión que obtenemos son los que se muestran en la Tabla 3. Vemos que la respuesta a la presión atmosférica es diferente para cada extensómetro, encontrando valores unas 2 veces superiores en el caso del CE92. Sin embargo, sometiendo los datos de presión a un análisis conjunto en las frecuencias de marea, con la misma metodología que hemos comentado para la temperatura, dada por la expresión (1), no se encuentran valores bien determinados en ninguna de las frecuencias de marea.

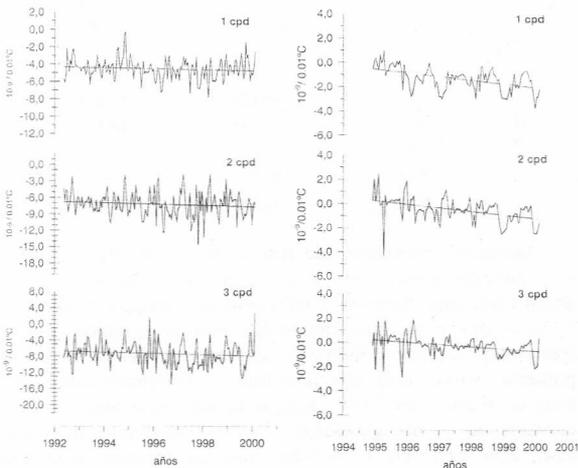


Figura 6 – Variación temporal del efecto de la temperatura sobre la extensión observada, obtenida en función de las frecuencias principales diurnas de marea, para los extensómetros CE92 (izquierda) y CE94 (derecha). (Time variation of the strain-temperature effect, obtained in function of the main diurnal tidal frequencies, for the extensometers CE92 (left) and CE94 (right)).

Tabla 3 – Coeficientes de regresión obtenidos mediante un análisis directo de los datos, para cada extensómetro. Los coeficientes están en  $10^{-9}/\text{mbar}$

|      | Coefficiente | emc    |
|------|--------------|--------|
| CE92 | 0.415        | 0.0236 |
| CE94 | 0.189        | 0.0102 |

Sí es destacable, por otro lado, la variación que encontramos de este efecto a lo largo del tiempo. Como puede apreciarse en la Figura 7, esta variación presenta una tendencia similar en ambos casos, con oscilaciones importantes a lo largo de todo el periodo de observación, y con una magnitud diferente para cada extensómetro.

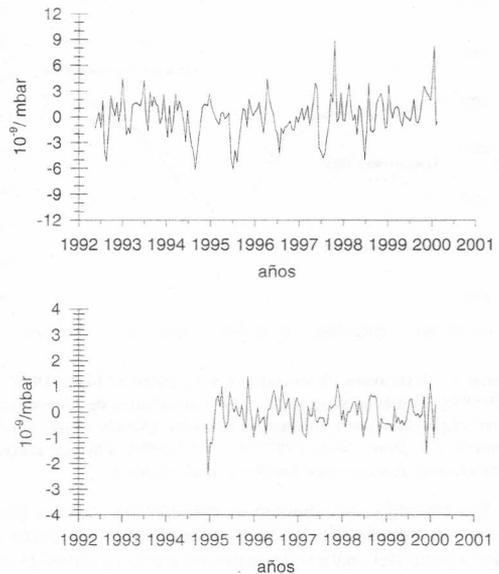


Figura 7 – Variación temporal del efecto de la presión atmosférica sobre la extensión observada, en toda la banda de frecuencias de marea, para los extensómetros CE92 (arriba) y CE94 (abajo). (Time variation of the strain-pressure effect, for all tidal frequency range, for the extensometers CE92 (up) and CE94 (down)).

Como podemos comprobar, debido a las variaciones de la presión atmosférica, se están produciendo deformaciones del terreno, de magnitud diferente en las dos direcciones de observación y que, recordamos, coinciden con la dirección longitudinal y transversal de la galería del túnel volcánico en que están instalados estos instrumentos de medida. Estas deformaciones están provocadas por el efecto de la presión atmosférica, mediante el efecto barométrico inverso. Como consecuencia, se produce una atracción provocada por la distribución de masas que origina una deformación elástica en la superficie terrestre. Además, se manifiesta en las mismas frecuencias de la marea oceánica, dada la proximidad a la costa del punto estación. Es decir, tenemos un efecto de la presión atmosférica sobre las medidas de extensión, inducido a través de la marea oceánica.

5. DEFORMACIONES OBSERVADAS

Los extensómetros instalados en la Cueva de los Verdes miden las variaciones en las medidas de longitud. Las series allí observadas se pueden interpretar, eliminado de éstas el propio efecto de la marea así como de otros fenómenos o efectos perturbadores que se puedan modelar, desde el punto de vista de las deformaciones del terreno en la zona de observación. Así, si en los datos observados eliminamos los modelos de marea (Tabla 1), junto con el efecto de la temperatura del aire, obtenemos una deriva residual que, teniendo en cuenta la longitud de las líneas de base de ambos extensómetros, podemos expresar en unidades reales de deformación.

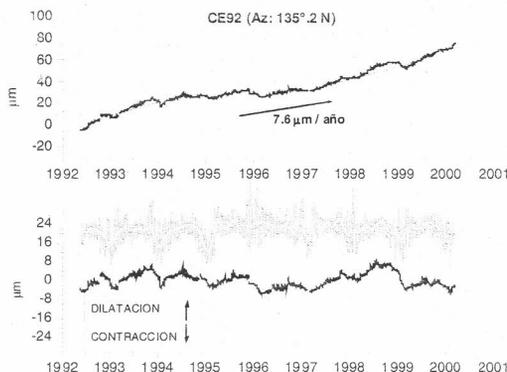


Figura 8 – (Arriba) Deriva residual obtenida, eliminando la marea, para el extensómetro CE92 y tendencia observada. (Abajo) Variación de la presión atmosférica y deriva residual después de eliminar la tendencia de largo periodo. ((Up) Residual drift, tide removed, for the extensometer CE92 and observed trend. (Down) Air pressure variation and residual drift, after remove the long-term trend).

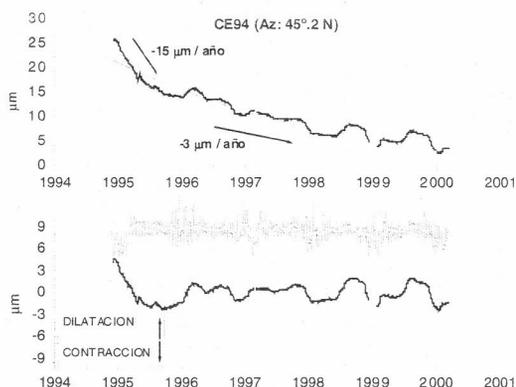


Figura 9 – (Arriba) Deriva residual obtenida, eliminando la marea, para el extensómetro CE94 y tendencia observada. (Abajo) Variación de la presión atmosférica y deriva residual después de eliminar la tendencia de largo periodo. ((Up) Residual drift, tide removed, for the extensometer CE94 and observed trend. (Down) Air pressure variation and residual drift, after remove the long-term trend).

Las Figuras 8 y 9 expresan la deformación (en micras) observada en CV por los dos extensómetros durante el periodo de registro. En la Figura 8 (gráfica superior) está indicada la tendencia de largo periodo observada, de unos 8  $\mu\text{m}$  por año. En el caso del CE94 (Figura 9, gráfica superior) este valor es, durante casi el primer año, de  $-15 \mu\text{m}$ , que es casi el doble del anterior y de sentido opuesto, probablemente debido a efectos de asentamiento de los pilares que soportan el extensómetro. Después de este periodo, pasa a estabilizarse en torno a  $-3 \mu\text{m}$  por año, valor inferior al obtenido en CE92 y de sentido opuesto.

Si en ambos casos eliminamos las tendencias de largo periodo, las derivas residuales obtenidas muestran variaciones anuales muy claras, de mayor amplitud en CE92, mostrando diferentes etapas de contracción y dilatación del terreno,

sucesivamente. En los gráficos inferiores de las Figuras 8 y 9 se ha sobrepuesto la variación de la presión atmosférica registrada en CV, durante el periodo de observación. Se puede apreciar cómo en muchos casos hay una clara correlación entre dicho parámetro atmosférico y la deformación observada por ambos instrumentos. Esto se debe, como comentábamos en el apartado 4, al efecto barométrico inverso. Este efecto induce deformaciones a través de la carga oceánica de marea, de mayor amplitud en la dirección longitudinal del túnel, en la que se encuentra instalado el CE92.

## 6. CONCLUSIONES

A partir de las observaciones de extensión que llevamos a cabo en la Cueva de los Verdes, situada en un túnel volcánico y que forma parte del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote, se han obtenido los respectivos modelos de marea para las direcciones longitudinal y transversal (acimutes de  $135^\circ.2\text{N}$  y  $45^\circ.2\text{N}$ , respectivamente) de dicho túnel. La calidad y precisión de estos modelos, nos permite estudiar cómo afectan diversos efectos perturbadores meteorológicos, como son la presión y temperatura del aire. Estas perturbaciones las hemos cuantificado, resultando de mayor amplitud en el caso del extensómetro situado en la dirección longitudinal (CE92). Asimismo, mediante el análisis en frecuencia, hemos encontrado que el efecto de temperatura presenta, en ambos casos, variaciones muy importantes en las frecuencias diurnas de marea, con amplitudes diferentes y con saltos cuantitativos importantes entre las bandas de 1 y 2 cpd. A su vez, los coeficientes obtenidos muestran claras variaciones temporales, con tendencias ligeramente diferentes para ambos extensómetros en las frecuencias principales diurnas. Con respecto a la presión atmosférica, no se encuentran variaciones en frecuencia, aunque sí aparecen variaciones temporales en los coeficientes obtenidos para toda la banda de marea.

En relación con la deformación observada, los resultados indican tendencias opuestas en ambos extensómetros y de magnitud superior en la dirección longitudinal. Estas deformaciones están originadas, fundamentalmente por el efecto termoelástico de la temperatura y por el efecto barométrico inverso, que genera deformaciones inducidas, en este caso, por la marea oceánica, dada la proximidad a la costa del lugar de observación.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Estas investigaciones se han llevado a cabo dentro del Proyecto AMB99-0824, de la CICYT, y del Convenio de Cooperación financiado por la Comisión Mixta Hispano-China del Mº de AA.EE.

## 8. REFERENCIAS

- Amoso, J., de Toro, C., Venedikov, A. P. and Vieira, R. (1997): "On the estimation of the precision of the tidal data". *Bulletin d'Informations des Marees Terrestres*, **127**, 9757-9767.
- Amoso, J., Cai Weixin, Vieira, R., Tan Shiling and Vélez, E. (1998): "Tidal tilt and strain measurements in the Geodynamics Laboratory of Lanzarote". *Earth Tides XIII, Ed. B. Ducarme and P. Pâquet*, 149-156.
- Harrison, J.C. y Herbst, K. (1977): "Thermoelastic strains and tilts revised". *Geophysical Research Letters*, **4**, 11, 535-537.

- Tamura, Y. (1987): " A harmonic development of the tide generating potential". *Bulletin d'Informations des Marees Terrestres*, **99**, 6813-6855.
- Venedikov, A.P., Arnosó, J., Vieira, R. (2001): "Program VAV/2000 for tidal analysis for unevenly spaced data with irregular drift". *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **47**, 1, 281-286.
- Vieira, R., Van Ruymbeke, M., Arnosó, J., d'Oreye, N., Fernández, J. and de Toro, C. (1991): "The Lanzarote Underground Laboratory". *Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Séismologie*, **4**, 71-86.
- Wyatt, F. (1982): "Displacement of surface monuments: horizontal motion". *Geophysical Research Letters*, **87**, 979-989.